

TRABAJO FIN DE GRADO

---

# ANÁLISIS DE VIBRACIONES DE UN EJE CON DEFECTO LATERAL

---

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



OCTUBRE 2018

AUTOR: FRANCISCO ARGUDO GONZÁLEZ  
TUTORA: MARTA ZAMORANO GARZÓN

## Resumen

En la actualidad el grado de automatización de las industrias es tan elevado que se hace difícil encontrar empresas en las que no exista la presencia de alguna máquina. Este hecho es un gran avance y en el futuro ira a más. Uno de los inconvenientes de las máquinas es que se averían o rompen, originando en ocasiones fuertes inversiones de capital en reparaciones y sustituciones. Además, estas averías pueden dar lugar a fallos catastróficos indeseables, lo que repercute gravemente en el normal funcionamiento de la empresa o industria. Para evitar que se den estos fallos catastróficos o reducir la probabilidad de que ocurran es habitual realizar labores de mantenimiento, y la tendencia actual es aplicar el mantenimiento predictivo. Estas tareas también generan unos costes, pero las empresas se dan cuenta cada vez más de que es una inversión que aumenta la fiabilidad y seguridad de las máquinas, por lo que al final el ahorro de costes es considerable.

En este trabajo se estudia el estado de un eje ferroviario a escala, que se coloca en una máquina de simulación de fallos para permitir su movimiento y la medición de las señales vibratorias. En este eje se ha realizado un defecto lateral (una fisura) en uno de los laterales y su profundidad se ha ido modificando sin desmontar el eje en ningún momento del estudio. Se aplica el *condition monitoring*, que es una técnica que forma parte del mantenimiento predictivo. Permite estudiar el estado de una máquina durante su funcionamiento y así detectar defectos antes de que se produzca un fallo, por lo que se logra ahorrar tanto dinero como tiempo, ya que se evita parar y desmontar la máquina para su estudio.

Primero, se ha realizado la medición de las señales vibratorias producidas durante el funcionamiento del eje en una máquina de simulación de fallos. Estas medidas se han tomado en primer lugar con el eje en buen estado (sin defecto) y después se han medido las señales de la misma forma para cada profundidad de fisura.

Segundo, estos datos obtenidos se han procesado mediante el software Matlab R2018a y se han empleado varias herramientas como la transformada rápida de Fourier o la transformada en paquetes Wavelet, con el fin de comparar las medidas tomadas y poder determinar aquellos parámetros que permitan obtener un patrón de comportamiento o umbral para poder averiguar si en un eje, del que no conocemos su estado, existe alguna fisura, y en la medida de lo posible, determinar su profundidad.

Resumiendo, se trata de encontrar un método que permita detectar la presencia de fisuras en condiciones de funcionamiento mediante un análisis experimental, aplicando conceptos teóricos estudiados y estimar la profundidad de esa fisura.

## Palabras clave

Procesamiento de señales · Vibraciones · Fisuras en ejes · Máquina de Simulación de Fallos

## Índice de contenidos

Resumen.....	1
Palabras clave.....	1
Índice de figuras .....	4
Índice de tablas .....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. MOTIVACIÓN.....	7
1.2. OBJETIVOS .....	9
1.3. NORMATIVA .....	10
1.4. ENTORNO SOCIOECONÓMICO .....	11
1.5. METODOLOGÍA.....	12
1.6. PLANIFICACIÓN.....	13
2. ESTADO DEL ARTE .....	14
2.1. MANTENIMIENTO .....	14
2.2. PROCESAMIENTO DE SEÑALES.....	17
2.2.1. La transformada de Fourier y sus variantes .....	19
2.2.2. Densidad de potencia espectral PSD.....	21
2.2.3. La transformada de Wavelet .....	22
2.3. DEFECTOS EN MÁQUINAS .....	30
3. SISTEMA EXPERIMENTAL.....	38
3.1. MÁQUINA DE ENSAYO-ROKIT .....	38
3.2. GRUPO DE MEDIDA .....	39
3.3. PROCESO DE GENERACION DE LAS SEÑALES VIBRATORIAS.....	44
3.4. PROCESO DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	45
3.5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....	47
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	48
4.1. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE PSD.....	48
4.1.1. PSD SOBRE EJE SANO .....	49
4.1.2. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 4,15% .....	50
4.1.3. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 8,3% .....	52
4.1.4. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 12,5% .....	53
4.1.5. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 16,65% .....	54
4.1.6. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 22,15% .....	56
4.1.7. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 25% .....	58
4.1.8. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 33,25% .....	59

---

4.1.9.	PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 41,65% .....	61
4.1.10.	PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 50% .....	62
4.1.11.	ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PSD .....	64
4.2.	RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE WTP .....	69
5.	PRESUPUESTO .....	74
6.	CONCLUSIONES .....	76
6.1	FUTUROS TRABAJOS.....	77
7.	BIBLIOGRAFIA.....	78
8.	ANEXOS .....	84
A.	PLANO DEL EJE .....	84



## Índice de figuras

Figura 1. Palier de transmisión de un automóvil .....	8
Figura 2. Bogie de un vehículo ferroviario .....	8
Figura 3. Eje de un torno .....	8
Figura 4. Esquema clasificación de las señales vibratorias .....	17
Figura 5. Imagen obtenida a través de la FFT sobre el eje sano a 60 Hz.....	20
Figura 6. Descomposicion de una señal en tres niveles .....	25
Figura 7. Descomposcion de una señal mediante la transformada discreta de Wavelet .....	26
Figura 8. Ejemplo de descomposcion de una señal mediante un analisis multifuncion .....	26
Figura 9. Niveles de descomposicion en la transformada de Wavelet por paquetes.....	27
Figura 10. Aplicación de la simetria especular sobre la señal de detalle .....	28
Figura 11. Rango de frecuencias asociados a cada paquete de Wavelet en los tres primeros grados de descomposicion.....	29
Figura 12. Partes de un rodamiento .....	30
Figura 13. Espectro de frecuencia asociado a BPFO .....	31
Figura 14. Espectro de frecuencia asociado a BPFI .....	31
Figura 15. Espectro de frecuencia asociado a BSF .....	32
Figura 16. Espectro de frecuencia asociado a FTF .....	32
Figura 17. Espectro de frecuencia asociado a la primera fase de deterioro del rodamiento ....	32
Figura 18. Espectro de frecuencia asociado a la segunda fase de deterioro del rodamiento ...	33
Figura 19. Espectro de frecuencia asociado a la tercera fase de deterioro del rodamiento ....	33
Figura 20. Espectro de frecuencia asociado a la cuarta fase de deterioro del rodamiento ....	33
Figura 21. Espectro de frecuencias asociado a la holgura de elementos rotativos .....	36
Figura 22. Sistema Rotokit y partes del mismo.....	39
Figura 23. Acelerómetro Brüel&Kjaer modelo 4383 .....	40
Figura 24. Acondicionador de señales modelo Nexus 2693, Brüel&Kjaer .....	41
Figura 25. Tarjeta de adquisicion de datos KUSB-3100 Keithley. ....	42
Figura 26. Selección de la tarjeta Keithley .....	43
Figura 27. Selección de los parametros necesarios para recibir las medidas .....	43
Figura 28. Visualizacion de los ciclos de medida en tiempo real .....	44
Figura 29. Regulador de velocidad .....	44
Figura 30. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje sano a 20 Hz .....	49
Figura 31. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje sano a 40 Hz .....	49
Figura 32. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje sano a 60 Hz .....	50
Figura 33. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 4,15% a 20 Hz .....	50
Figura 34. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 4,15% a 40 Hz .....	51
Figura 35. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 4,15% a 60 Hz .....	51
Figura 36. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 8,30% a 20 Hz .....	52
Figura 37. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 8,30% a 40 Hz .....	52

Figura 38. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 8,30% a 60 Hz .....	53
Figura 39. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 12,50% a 20 Hz .....	53
Figura 40. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 12,50% a 40 Hz .....	54
Figura 41. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 12,50% a 60 Hz .....	54
Figura 42. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 16,65% a 20 Hz .....	55
Figura 43. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 16,65% a 40 Hz .....	55
Figura 44. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 16,65% a 60 Hz .....	56
Figura 45. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 22,15% a 20 Hz .....	56
Figura 46. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 22,15% a 40 Hz .....	57
Figura 47. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 22,15% a 60 Hz .....	57
Figura 48. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 25,00% a 20 Hz .....	58
Figura 49. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 25,00% a 40 Hz .....	58
Figura 50. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 25,00% a 60 Hz .....	59
Figura 51. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 33,25% a 20 Hz .....	59
Figura 52. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 33,25% a 40 Hz .....	60
Figura 53. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 33,25% a 60 Hz .....	60
Figura 54. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 41,65% a 20 Hz .....	61
Figura 55. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 41,65% a 40 Hz .....	61
Figura 56. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 41,65% a 60 Hz .....	62
Figura 57. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 50,00% a 20 Hz .....	62
Figura 58. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 50,00% a 40 Hz .....	63
Figura 59. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 50,00% a 60 Hz .....	63
Figura 60. Representacion de la energia mediante los paquetes de Wavelet a 20 Hz .....	70
Figura 61. Representacion de la energia mediante los paquetes de Wavelet a 40 Hz .....	70
Figura 62. Representacion de la energia mediante los paquetes de Wavelet a 60 Hz. ....	71

---

Figura 63. Comparación de energías entre los paquetes Wavelet a 20 Hz.....	71
Figura 64. Comparación de energías entre los paquetes Wavelet a 40 Hz.....	72
Figura 65. Comparación de energías entre los paquetes Wavelet a 60 Hz.....	72

## Índice de tablas

Tabla 1. Diagrama de GANTT del desarrollo del trabajo.....	13
Tabla 2. Características principales del acelerometro Brüel&Kjaer modelo 4383 .....	40
Tabla 3. Características principales del acondicionador de señales modelo Nexus 2693, Brüel&Kjaer .....	41
Tabla 4. Características principales de la tarjeta de adquisicion de datos KUSB-3100 Keithley. ....	42
Tabla 6. Datos de los tres primeros armónicos de eje sano en las tres frecuencias de giro .....	64
Tabla 7. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 4,15% en las tres frecuencias de giro.....	64
Tabla 8. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 8,30% en las tres frecuencias de giro.....	65
Tabla 9. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 12,15% en las tres frecuencias de giro.....	65
Tabla 10. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 16,65% en las tres frecuencias de giro.....	65
Tabla 11. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 22,15% en las tres frecuencias de giro.....	66
Tabla 12. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 25,00% en las tres frecuencias de giro.....	66
Tabla 13. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 33,25% en las tres frecuencias de giro.....	66
Tabla 14. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 41,65% en las tres frecuencias de giro.....	67
Tabla 15. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 50,00% en las tres frecuencias de giro.....	67
Tabla 16. Comparación de las amplitudes de los distintos niveles de defecto con las amplitudes de eje sano a 20 Hz.....	68
Tabla 17. Comparación de las amplitudes de los distintos niveles de defecto con las amplitudes de eje sano a 40 Hz.....	68
Tabla 18. Comparación de las amplitudes de los distintos niveles de defecto con las amplitudes de eje sano a 60 Hz.....	69
Tabla 19. Presupuesto de los costes que conllevan este estudio .....	74

## 1. INTRODUCCIÓN

En la industria el fin último es el de generar beneficios, lo cual se puede lograr reduciendo los costes de la operación industrial de cada empresa. Esto, teniendo en cuenta el alto grado de automatización actual se puede enfocar en aplicar un tipo de mantenimiento que permita reducir la posibilidad de que ocurra algún fallo, el tiempo y, por tanto, los costes.

La tendencia actual es aplicar el mantenimiento predictivo [1], pues es una técnica que permite aplicarse a componentes que indican condiciones no aceptables y que permite prever cuando fallará la máquina. De esta forma, se consigue ahorrar costes, ya que el componente se reemplaza o arregla justo al final de su vida útil. Con ello se permite disminuir el tiempo que la máquina está parada y la vida útil se maximiza, con lo que además aumentará la productividad.

Más concretamente, dentro del mantenimiento predictivo, existe una técnica llamada *condition monitoring* (monitorización de estado). Es especialmente interesante porque permite estudiar el estado y operatividad de una máquina continuamente durante su funcionamiento. Esto es posible gracias a que se conocen los valores de variables representativas que se pueden comparar con las de un funcionamiento normal de la máquina. Así, se conoce la presencia de un problema mucho antes de que ocurra un fallo y se soluciona en el momento adecuado, ahorrando costes y tiempo [2].

En este trabajo, mediante el *condition monitoring*, y concretamente mediante análisis de vibraciones se estudia el estado de un eje ferroviario a escala, obteniendo las señales vibratorias tanto para el eje en su estado inicial (sin fisuras), para conocer un patrón de funcionamiento normal, como para el eje con fisuras que se han ido realizando progresivamente sin desmontar el eje de la máquina de ensayos. Así, se podrán comparar las señales obtenidas en el eje fisurado con las señales obtenidas en el eje sano.

### 1.1. MOTIVACIÓN

La industria demanda cada vez más a los sistemas de producción, lo que hace que los equipos sean más sofisticados. Esto hace que las tareas de mantenimiento tradicionales empiecen a ser no válidas. Actualmente, industrias más avanzadas como la de la aviación o la de energía eólica [3] empiezan a usar técnicas de *condition monitoring*, de ahí la importancia de que muchas líneas de investigación se centren en estudiar cómo detectar defectos en las máquinas aplicando este tipo de mantenimiento predictivo, ya que posee más ventajas frente a otras tareas.

Hoy en día, la mayoría de las máquinas tienen como elemento principal una parte rotatoria, que en gran parte de los casos viene a ser un eje: los palieres de la transmisión (ver Figura 1) o el árbol de transmisión de un automóvil, los ejes ferroviarios (ver Figura 2), el eje de un torno (ver Figura 3), etc. Motivo por el cual este trabajo se centra en estudiar este componente mecánico.



Figura 1. Palier de transmisión de un automóvil [4]

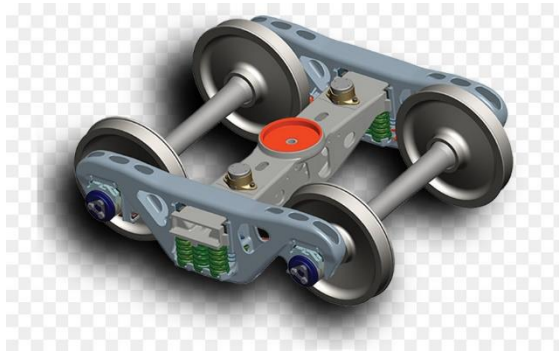


Figura 2. Bogie de un vehículo ferroviario [5]



Figura 3. Eje de un torno [6]

Además, cabe destacar que las máquinas que poseen algún elemento de este tipo tienen una alta probabilidad de sufrir un fallo catastrófico si el eje se rompe, por lo que es un elemento crítico en cuanto a seguridad. Un ejemplo de esto es el del accidente de “Viareggio” [7] en el que la rotura de un eje ferroviario provocó la muerte de 16 personas y 15 heridos de gravedad. Con el fin de evitar este tipo de catástrofes, es importante invertir en mantenimiento y estudiar el estado de los ejes antes de su rotura. Esto hace especialmente interesante las investigaciones actuales sobre el diagnóstico de defectos en ejes, no solo desde el punto de vista de la seguridad, sino también con el fin de ahorrar tiempo y costes, evitando paradas de la maquinaria innecesarias o cambiando los componentes defectuosos justo al final de su vida útil y antes de que se produzca un fallo.

En definitiva, este trabajo fin de grado está basado en realizar un estudio de fisuras en ejes, aplicando técnicas de mantenimiento predictivo, y en especial, de *condition monitoring*, mediante el análisis de vibraciones. Para ello, se coloca una cadena de medida, que incluye un acelerómetro sobre el eje a estudiar para así obtener las señales vibratorias que se producen durante su funcionamiento. Estas señales es necesario procesarlas, aplicando varias herramientas para que proporcione información útil. Para analizar las señales vibratorias es muy rentable representarlas en el dominio de la frecuencia, ya que permite detectar más fácilmente la presencia de defectos. Este tipo de análisis no es solo válido para detectar fisuras en ejes, también es muy utilizado para detectar defectos en rodamientos, holgura en el eje, desequilibrio, etc.

## 1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo fin de grado es determinar, a partir de las señales vibratorias que se producen durante el funcionamiento de un eje ferroviario a escala, qué métodos son más favorables y en qué casos se ve más clara la presencia de una fisura, con el fin de encontrar un comportamiento o qué parámetros permiten diagnosticar si un eje está en buenas condiciones o si por el contrario presenta una fisura, y si es posible, determinar la profundidad de dicha fisura.

Para llevar a cabo este objetivo, es necesario cumplir con otros objetivos secundarios con anterioridad:

- Recoger información sobre mantenimiento predictivo, y en concreto de *condition monitoring* mediante análisis de vibraciones.
- Estudiar bibliografía sobre defectos en máquinas, y en concreto sobre fisuras en ejes.
- Estudiar procesamiento de señales y las herramientas más empleadas.
- Aprender el funcionamiento y uso de la máquina de simulación de fallos utilizada.
- Preparar la máquina de simulación de fallos para realizar los ensayos, montando el eje que se va a estudiar y conectando la cadena de medida para tomar las señales vibratorias.
- Realización de las fisuras en el eje entre ensayo y ensayo.
- Toma de datos (señales vibratorias) en la máquina de simulación de fallos, de un eje ferroviario a escala montado sobre una máquina de simulación de fallos, tanto para el eje en su estado inicial (sin fisuras) como para el eje con progresivas fisuras.
- Procesamiento de las señales vibratorias.
- Comparación de las señales para establecer un patrón de comportamiento, determinando cuáles métodos son más favorables para detectar futuras fisuras.

### 1.3. NORMATIVA

Dentro de la normativa que regula la emisión de vibraciones hay que destacar dos campos de aplicación:

- En primer lugar, dado que el estudio se realiza en un centro docente, la emisión de vibraciones está regulada por medio del Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, donde se desarrolla la ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetos de calidad y emisiones acústicas [8].

En la citada ley se define la contaminación acústica como “la presencia en el ambiente de ruido o vibraciones, cualquiera que sea el emisor acústico que los origine, que implique molestia, riesgo o daño para las personas, para el desarrollo de sus actividades o para los bienes de cualquier naturaleza, incluso cuando su efecto sea perturbar el disfrute de los sonidos de origen natural, o que causen efectos significativos sobre el medio ambiente” [8].

En este documento, en concreto en el Anexo V, se establecen los criterios para asignar al territorio la clase de área acústica, encontrándose la Universidad Carlos III de Madrid dentro del área acústica tipo “e”, la cual corresponde a “zonas del territorio destinadas a usos sanitarios, docentes y cultural que requieran especial protección contra la contaminación acústica”, incluyéndose zonas exteriores como el campus de la universidad y zonas internas como la biblioteca y las áreas de investigación o laboratorios.

En el Anexo II, se establecen los objetivos de calidad acústica aplicables tanto al área urbana como al interior de los edificios de cada área urbana en función del tipo de área acústica.

En el Anexo III, se indican los valores límite de inmisión de ruido por parte de infraestructuras varias como la viaria, ferroviaria o aeroportuaria, así como los valores límite de inmisión de ruido transmitidos por parte de los locales colindantes.

Todo lo citado anteriormente es regulado en base a la Norma UNE-ISO 2631-2:2011 “evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero. Parte 2: vibraciones en edificios (1 Hz a 80 Hz)”.

- Por otro lado, dado que se trabaja en presencia de vibraciones, existe otro real decreto que detalla la prevención de riesgos laborales estableciendo las disposiciones mínimas para la protección y seguridad de los trabajadores frente a riesgos para su seguridad y salud derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas [9]. Esto queda establecido a través del Real Decreto 1311/200, de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas.

En este Real Decreto se estipulan:

- Los valores límite de exposición y los valores límites de exposición que dan lugar a una acción.
- La determinación y evaluación de los riesgos, la cual corre a cargo del empresario.
- Las disposiciones dirigidas a reducir o evitar la exposición a las vibraciones mecánicas.



- La información y formación de los trabajadores, a través de la cual desarrollan las competencias necesarias para evitar o reducir al mínimo los riesgos derivados de la vibración mecánica.
- La vigilancia de la salud de los trabajadores, llevada a cabo por el empresario, siempre que durante la evaluación de riesgos prevista se ponga de manifiesto la existencia de un riesgo para la salud.

#### 1.4. ENTORNO SOCIOECONÓMICO

Este trabajo se basa en un estudio de defectos en ejes. Con ello se pretende encontrar un método para diagnosticar rápida y fácilmente los defectos en ejes, en concreto fisuras. Esto puede evitar que los ejes rompan y generen accidentes, desde problemas como roturas de máquina, hasta más graves que impliquen la seguridad de las personas. Por tanto este trabajo, desde el punto de vista social, surge de la necesidad de poder identificar un defecto en un elemento crítico dentro de una máquina, como un eje, antes de que este defecto desencadene en un fallo catastrófico, obteniéndose una mayor seguridad hacia las personas, ya que se pueden evitar los fallos catastróficos de las máquinas, y con ello el riesgo de sufrir accidentes. Dentro del ámbito económico, el fin mayor es el de obtener un mayor beneficio. Este se puede obtener de muchas maneras. En este caso, este estudio podría desencadenar en un ahorro en los costes de mantenimiento eliminando las paradas imprevistas gracias a la aplicación del *condition monitoring* y a un sistema de interpretación de los datos en tiempo real, donde es posible conocer el estado del eje durante el funcionamiento del mismo.

En definitiva, se podría resumir este apartado en dos conceptos:

- Aumentar la seguridad de las personas, viajeros de manera directa, y peatones de manera indirecta.
- Incrementar los beneficios obtenidos reduciendo costes innecesarios en el mantenimiento de las máquinas y ahorrar tiempo, evitando las paradas y desmontajes programados, y reemplazando los componentes solo cuando es necesario.

Todo ello realizando una investigación con el fin de obtener parámetros que indiquen la presencia de fisuras laterales en ejes ferroviarios, que aporta a la industria una manera más rápida y fiable de detectar dichos defectos.



## 1.5. METODOLOGÍA

En este documento se van a detallar las bases teóricas necesarias para poder llevar a cabo un estudio de vibraciones sobre un eje con defecto lateral. Este estudio comprende desde la obtención de las señales vibratorias ensayadas en un banco dispuesto para ello, hasta su posterior procesamiento, de manera que con la información generada sea posible realizar un diagnóstico sobre el estado del eje. Este documento está estructurado en seis capítulos, los cuales son:

1. Un primer capítulo, la introducción, en el que se habla en líneas generales de los conceptos básicos que engloba este trabajo. También se exponen los objetivos, la motivación y el entorno socioeconómico.
2. En el capítulo 2 priman los conceptos teóricos básicos que se deben tener en cuenta a la hora de poder transformar las señales vibratorias recogidas en el banco de ensayos en información relevante sobre el estado del eje. Este bloque, a su vez, se divide en dos partes bien definidas:
  - Se definen las técnicas empleadas en el procesamiento de las señales: Transformada de Fourier y sus variantes (sobre todo la Transformada rápida de Fourier (FFT)), la densidad de potencia espectral (PSD) y la transformada de Wavelet.
  - Se detallan los defectos en máquinas rotativas más comunes, entrando más en profundidad en las fisuras sobre un eje rotativo y sus posibles consecuencias.
3. En el capítulo 3, dirigido al sistema experimental, se detalla paso por paso el procedimiento llevado a cabo para la toma de medidas vibratorias. Se detalla pues:
  - El banco de ensayos donde se toman las medidas o señales vibratorias, las partes de este y su función durante la toma de medidas.
  - El procedimiento llevado a cabo durante la adquisición de los datos.
  - El software empleado para el procesamiento de las señales.
4. Dentro del cuarto capítulo se muestran los resultados obtenidos tras la realización del desarrollo experimental. Posteriormente, se analizan dichos resultados y se hacen algunas conclusiones específicas.
5. El capítulo 5 contiene el presupuesto estimado de la realización de este trabajo.
6. El capítulo 6 contiene las conclusiones de todo el trabajo, incluyendo futuras líneas de investigación.

## 1.6. PLANIFICACIÓN

En la Tabla 1 se observa un diagrama de GANTT, en el que se recogen los tiempos que han ocupado las tareas más relevantes del trabajo, comenzando en marzo de 2018 y terminando en septiembre de 2018.

Tarea	03/18	04/18	05/18	06/18	07/18	08/18	09/18
1. Recoger información sobre mantenimiento.							
2. Estudiar defectos en máquinas, fisuras en ejes.							
3. Estudiar procesamiento de señales y herramientas comunes.							
4. Aprender el uso de la máquina de simulación de fallos.							
5. Preparar el ensayo.							
6. Toma de medidas y realización de las fisuras.							
7. Procesamiento de datos.							
8. Comparación de resultados.							
9. Redacción del documento.							

Tabla 1. Diagrama de GANTT del desarrollo del trabajo

## 2. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se presenta un estado del arte sobre los conceptos más importantes. En primer lugar se habla sobre el mantenimiento en general, describiendo los principales tipos de mantenimiento que hay y después se entra más en detalle en el tipo de mantenimiento que se aplica en este trabajo, concretamente en el mantenimiento que se realiza en los ejes ferroviarios. En segundo lugar se habla sobre el procesamiento de señales, explicando las herramientas empleadas para este estudio. También se entrará más en detalle en la teoría relacionada sobre los defectos en ejes, que es lo que ocupa este trabajo.

### 2.1. MANTENIMIENTO

Actualmente hay muchos tipos de mantenimiento que se aplican en la industria. En función de parámetros como el coste de la máquina, su finalidad o uso, el tiempo de uso, etc., es más rentable aplicar un tipo de mantenimiento u otro. Los principales tipos son [10]:

- Mantenimiento correctivo: consiste básicamente en resolver la avería una vez ha fallado la máquina. En este tipo de mantenimiento la intervención no está programada ya que hasta que no surge la avería no se procede a su reparación. Esto conlleva que el equipo que vaya a realizar la reparación deba de estar preparado, además de contar con stock relativamente grande, con el fin de minimizar el tiempo de parada de la máquina mientras se repara, y con ello reducir la pérdida de rentabilidad por la inoperatividad durante el mantenimiento. Cabe destacar que este tipo de mantenimiento a menudo genera unos costes elevados. Además, desde el punto de vista de la seguridad no es el más adecuado, ya que como se ha mencionado anteriormente hay una serie de elementos que no es recomendable que fallen.
- Mantenimiento preventivo: como su propio nombre indica, trata de prevenir la aparición de averías. Este mantenimiento se basa en el concepto de desgaste. Se entiende que los componentes con el tiempo van perdiendo sus propiedades hasta que finalmente se averían. Este mantenimiento estima los tiempos de vida en funcionamiento de los componentes y planifica la parada de la máquina y la sustitución del componente en cuestión antes de que éste falle. Cabe destacar que este tipo de mantenimiento se suelen programar, en la medida de lo posible, en horas bajas de funcionamiento, como por ejemplo en los periodos de vacaciones, cuando hay poca producción, etc.
- Mantenimiento predictivo: sirve para prever el momento de fallo de un componente de una máquina, de tal manera que se pueda intervenir sobre la máquina antes de que se origine el fallo [11]. Esto se puede lograr conociendo por ejemplo las vibraciones en cojinetes, la temperatura de las conexiones eléctricas, la viscosidad de un líquido hidráulico, la temperatura del refrigerante de un motor, etc. Hay varias técnicas empleadas en este tipo de mantenimiento, como las técnicas de ensayo no destructivo (NDT) [12]. Estas técnicas no invasivas permiten identificar y caracterizar un material y determinar su estado sin dañarlo. Los más comunes son [13]:

- Termografía.
- Ultrasonidos.
- Radiografía.
- Líquidos penetrantes
- Partículas magnéticas.
- Inspección visual.
- Corrientes inducidas.

Una vez conocidos los tipos de mantenimiento principales, este trabajo se puede incluir dentro del mantenimiento predictivo, el cual presenta las siguientes ventajas [2]:

- Incremento de la disponibilidad de la maquinaria.
- Mejora de la fiabilidad global como consecuencia de la reducción de los errores humanos introducidos durante las intervenciones de mantenimiento. Al reducirse el número de intervenciones por mantenimiento, se minimiza la probabilidad de introducir un error humano durante el proceso de mantenimiento.
- Siguiendo el punto anterior, un menor número de intervenciones también reduce la materia prima necesaria durante el mantenimiento. Por tanto, se reduce el gasto en repuestos y en mano de obra.
- Utiliza los componentes de la máquina durante la mayor parte de su vida útil, amortizando su valor durante más tiempo.
- Son técnicas no invasivas.
- El uso de la monitorización (*condition monitoring*) reduce el número de accidentes. Mediante los datos obtenidos en la monitorización, se define un programa analítico cuyo objetivo es el de reducir los fallos en general dentro de la máquina y con ello, prevenir los fallos catastróficos. Por esto, la monitorización también genera un aumento en la seguridad y fiabilidad de las máquinas.
- Al aumentar la seguridad, se disminuye el riesgo. Como consecuencia de esto, los costes por seguros industriales se reducen debido a que la compañía aseguradora percibe menor riesgo.

Centrándose más en el mantenimiento predictivo que se realiza sobre ejes ferroviarios, hay que tener en cuenta las técnicas de inspección no destructivas que se aplican a día de hoy. Las más comunes son [14]: **ultrasonidos**, **líquidos penetrantes** y **partículas magnéticas**. A continuación se describe brevemente cada técnica:

- Ultrasonidos [15]: esta técnica permite encontrar discontinuidades internas en el material (fisuras). Emplean un elemento denominado transductor, el cual se sitúa sobre la superficie del eje. El transductor o palpador emite una señal acústica que viaja a través del material, rebota en el extremo contrario y regresa al transductor. A través de un software se calcula el tiempo que la señal ha tardado en regresar. En función de ese tiempo se puede averiguar si el material tiene una discontinuidad interna o no, ya que si la tuviera, la señal rebotaría en la discontinuidad, reduciendo el tiempo de circulación de la señal.

- Líquidos penetrantes [16]: esta técnica se emplea para detectar discontinuidades superficiales o internas pero abiertas a la superficie. Se emplea un líquido penetrante fluorescente, el cual penetra en el material por capilaridad. Una vez que el líquido a penetrado, se aplica un agente revelador cuya misión no es otra que la de absorber el líquido dejando una marca visual clara sobre la situación de la discontinuidad.
- Partículas magnéticas [17]: esta técnica se aplica sobre materiales ferromagnéticos (en este caso un eje ferroviario). Se emplea un líquido que contiene partículas magnéticas o bien partículas magnéticas en polvo seco sobre la superficie del material. Por medio del magnetismo o campo magnético, estas partículas se quedan adheridas sobre la superficie formando patrones como consecuencia de las fugas del campo magnético debidas a las discontinuidades internas del material.

Aunque estas técnicas son las más utilizadas en la actualidad, cabe destacar que tienen una serie de desventajas, las cuales se numeran a continuación [18]:

- En el caso de que exista o se produzca un daño o fallo inmediato en algún componente de la máquina y sea necesaria su reparación urgente, esta no será llevada a cabo hasta la fecha de su programación.
- El personal que realiza este tipo de mantenimiento debe estar altamente cualificado, ya que debe saber interpretar los datos que obtiene mediante los estudios pertinentes que realice. Esto hace que los costes de mano de obra se incrementan dado que el operario en este caso es un especialista.
- Se requieren equipos costosos y actualizados, por lo que la inversión inicial suele ser elevada.

Como solución a esta serie de desventajas es interesante estudiar la posibilidad de implantar algún sistema que permita aprovechar el tiempo de vida de los componentes realizando las labores de mantenimiento cuando sean estrictamente necesarias. Esto se consigue a través del mantenimiento basado en la condición o *condition monitoring* [19].

Las ventajas de implantar el mantenimiento basado en la condición son las siguientes [20]:

- Permite disminuir los fallos o averías en tiempo de duración y en número.
- Aumento de la seguridad y disponibilidad de las máquinas e instalaciones.
- Este sistema mejora a través de la experiencia. Almacena y transmite el conocimiento adquirido a través de las sucesivas mediciones a lo largo del tiempo, creando tendencias de deterioro en los componentes analizados. Los datos obtenidos son extrapolables a proyectos de otras instalaciones y viceversa.
- Permite planificar y programar las intervenciones ahorrando tiempo, recursos económicos, mano de obra, etc. Por eso reduce los costes de intervención y mantenimiento.

De ahí, la actual tendencia de estudiar la máquina durante el funcionamiento, aplicando el *condition monitoring*. Este tipo de mantenimiento, incluido dentro del mantenimiento predictivo es muy común aplicarlo a maquinaria rotatoria, ya que el fallo en este tipo de máquinas suele ser catastrófico. Más en detalle, el análisis de vibraciones permite diagnosticar variedad de defectos sin necesidad de parar ni desmontar la máquina. Con el *condition*

*monitoring* se puede estudiar las condiciones operativas de la máquina en cuestión durante su funcionamiento a través de una serie de dispositivos, sensores y software capaz de interpretar las señales recogidas y aportar datos concluyentes. Con ello se consigue evaluar las variables características que pueden indicar cuando hay un defecto en un elemento estudiado y cuando derivará en un posible fallo catastrófico, comparándolo siempre con un patrón que se conozca de funcionamiento normal.

Por lo tanto, en este trabajo se va a proceder a estudiar el comportamiento de un eje ferroviario a escala mediante técnicas relacionadas con el mantenimiento predictivo, concretamente se aplica el *condition monitoring* realizando un análisis de las vibraciones que se miden durante el funcionamiento del eje sobre la máquina de ensayos.

## 2.2. PROCESAMIENTO DE SEÑALES

A través del *condition monitoring*, y en concreto mediante el análisis de vibraciones, se puede detectar un fallo dentro del sistema a estudiar. Para ello se obtiene una serie de señales producidas por la vibración, gracias a una cadena de medida instalada entre la máquina y el ordenador. Estas señales se procesan a través de una serie de técnicas o herramientas que se van a explicar a continuación. Se debe estudiar las señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

Como en este trabajo se va a trabajar con señales vibratorias, es necesario conocer los tipos que existen. En la Figura 4 se puede observar una clasificación de las señales vibratorias.

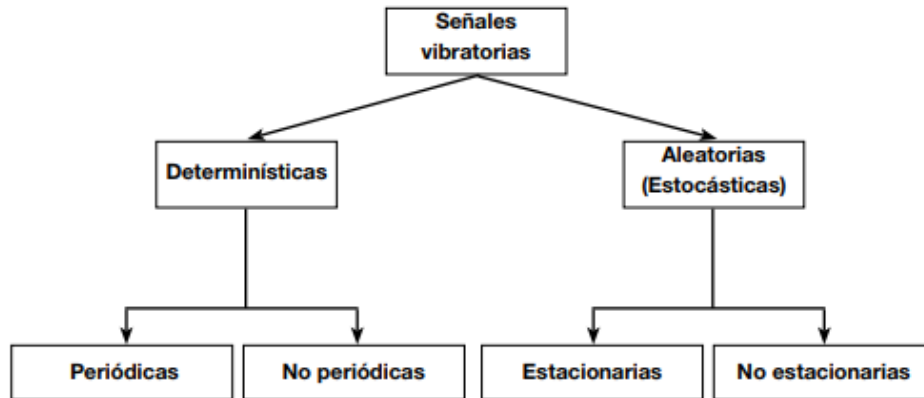


Figura 4. Esquema clasificación de las señales vibratorias [21]

Se pueden dividir las señales en dos grandes grupos en función de su cinemática [21]:

- Deterministas.
- Aleatorias o estocásticas.

Las señales deterministas son aquellas que mediante una expresión matemática sencilla son capaces de representar fenómenos vibratorios. Estas señales se dividen a su vez en:

- Periódicas: están formadas por una serie de frecuencias que varían a lo largo del tiempo, pero que se repiten de forma regular. Un ejemplo de este tipo de señales sería una señal sinusoidal.
- No periódicas: este tipo de señales se caracteriza por iniciarse y terminar en un mismo valor, que en la mayoría de los casos suele ser cero en el dominio del tiempo. Un ejemplo de este tipo de señal sería un impacto.

Las señales aleatorias o estocásticas son aquellas cuyo valor instantáneo no puede ser predicho, pero puede ser acotado por medio de una función de densidad de probabilidad. Estas señales se dividen en:

- Estacionarias: las distribuciones de probabilidad que caracterizan la señal no dependen del instante en que se analice la señal.
- No estacionarias: las distribuciones de probabilidad dependen del instante en que se analice la señal.

En este trabajo las señales vibratorias recogidas durante los ensayos se corresponden al grupo de señales aleatorias en tiempo discreto [22]. Se recogen muestras en intervalos de tiempo fijos  $\Delta t$ . Se puede representar una medida de una vibración por medio de la expresión (Ec.1):

$$X = [x(1), x(2), \dots, x(N)] = x(i) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

- $X$  es la medida de la vibración.
- $N$  es el número de puntos o muestras de la señal.

El número de muestras se define según la expresión (Ec.2):

$$N = T \cdot f_s \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

- $T$  es el tiempo de adquisición de datos.
- $f_s$  es la frecuencia de muestreo.

El intervalo del tiempo  $\Delta t$  sobre el que se adquiere cada muestra  $x(i)$  de la señal vibratoria se corresponde a la expresión (Ec.3):

$$\Delta t = \frac{T}{f_s} \quad (\text{Ec. 3})$$

La frecuencia de muestreo  $f_s$  limita la frecuencia máxima hasta la que se puede reconstruir la señal original. Por medio del teorema de Nyquist [22] se define la frecuencia de Nyquist  $f_N$  como la frecuencia máxima a la que se puede reconstruir la señal vibratoria. Esta frecuencia se define mediante la expresión (Ec.4):

$$f_N = 0,5 \cdot f_s \quad (\text{Ec. 4})$$

Para poder extraer la información aportada por las señales se aplican una serie de técnicas, entre las que cabe destacar [21]:

- La transformada de Fourier y sus variantes:
  - o La transformada rápida de Fourier.
  - o La transformada discreta de Fourier
  - o Short time Fourier transform.
- La función de densidad de potencia espectral (PSD).
- La transformada Wavelet:
  - o La transformada discreta Wavelet.
  - o La transformada Wavelet Packet.

Existe un inconveniente a la hora de aplicar estas técnicas, en concreto con la transformada de Fourier. Esta transformada solo es aplicable a funciones deterministas periódicas. Esto es un problema ya que la mayoría de las señales no son periódicas. Sin embargo, existen varias soluciones. Las más empleadas son [23]:

- Tratar una señal no periódica como una señal periódica de periodo infinito.
- Dividir la señal no periódica en partes estacionarias continuas.

A continuación se van a describir las técnicas mencionadas anteriormente, exponiendo brevemente cuales serían las más apropiadas para este caso en concreto:

### 2.2.1. La transformada de Fourier y sus variantes

La **transformada de Fourier (FT)** [25] es una herramienta empleada para traducir señales que se encuentran en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. La transformada de Fourier descompone una señal compleja en un conjunto de señales simples (sinusoidales o cosinusoidales) las cuales pasará al dominio de la frecuencia. Sin embargo, esta transformada  $X(f)$  requiere un volumen de cálculos demasiado grande, tal y como se observa en la ecuación (Ec.5), elevando significativamente los costes, por lo que se suele emplear una variación de esta técnica, la **transformada discreta de Fourier (DFT)**.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{(-j2\pi ft)} \cdot dt \quad (\text{Ec. 5})$$

La DFT es una variación de la transformada original de Fourier que se aplica a un número finito de muestras durante un intervalo de observación finito. Resumiendo, con la DFT se obtienen N componentes de frecuencia a partir de N componentes en el tiempo por medio de  $N^2$  operaciones. Si se aplica esto sobre la ecuación (Ec.5), y empleando una serie de ecuaciones diferenciales y parciales se obtiene la ecuación (Ec.6):

$$x(k) = \sum_{i=0}^{i=N} x(i) \cdot e^{(-j2\pi ki)} \quad (\text{Ec. 6})$$



Aun aplicando la DFT, el volumen de cálculos a realizar sigue siendo elevado. Como solución empleada se aplica otra variante de las transformadas de Fourier, la **transformada rápida de Fourier (FFT)** [25]. Su aplicación reduce los cálculos necesarios de  $n^2$  a  $n \cdot \log_2(n)$ . El único requisito para su aplicación es que el número de puntos de la serie temporal debe ser potencia de 2 ( $2^n$ ) [26]. La FFT consigue esta reducción del volumen de cálculos eliminando la mayor parte de estos, los cuales son repetitivos durante la aplicación de la DFT. En la Figura 5, se muestra el aspecto de una de las FFT calculadas durante este trabajo.

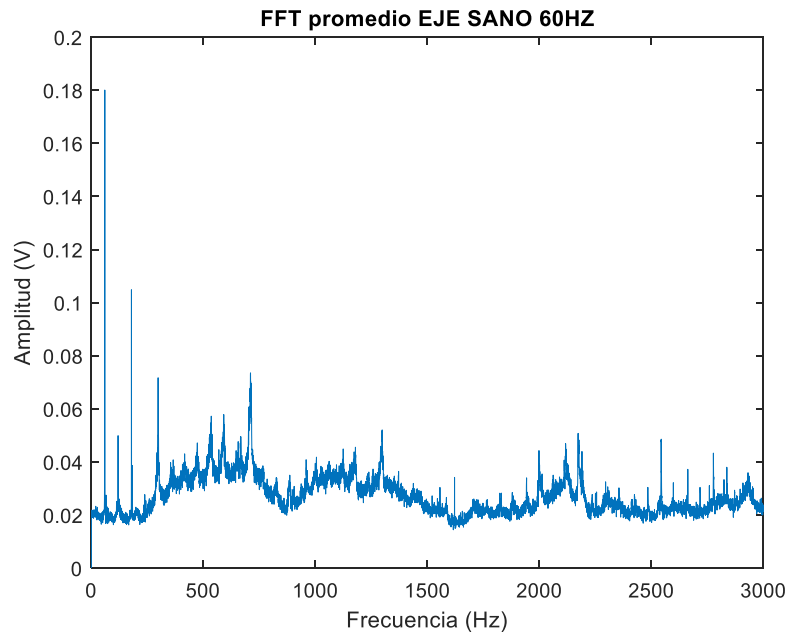


Figura 5. Imagen obtenida a través de la FFT sobre el eje sano a 60 Hz

Hay que tener en cuenta que la aplicación de la FFT puede ocasionar algunos errores sobre la señal traducida. Los más importantes son:

- Aliasing [27]: este fenómeno se da cuando la señal analógica se muestrea a una frecuencia inferior a la frecuencia mínima de muestreo o frecuencia de Nyquist establecida por el teorema de Nyquist-Shannon. Cuando esto ocurre, las frecuencias superiores a la frecuencia de muestreo se solapan deformando las frecuencias más bajas, introduciendo ruido en la señal final. Para solucionarlo, antes de realizar el muestreo se aplica un filtro de paso bajo o filtro antialiasing para eliminar las frecuencias superiores a la de muestreo.
- Leakage [28]: es un error introducido por la FFT. Como se ha explicado anteriormente, la FFT se aplica en una longitud temporal finita, a diferencia de la FT original que cubre una longitud temporal infinita. La FFT pasa al dominio de la frecuencia una señal temporal en un intervalo finito, pero replica este mismo intervalo durante el tiempo. El error conocido como Leakage, pérdida o fuga, se hace visible en el dominio de la frecuencia cuando los puntos de solapamiento de los intervalos finitos de la señal no son los mismos. La solución más empleada es la de forzar a la señal muestreada a que termine en cero en los extremos del intervalo finito de muestreo, de forma que cuando la señal se replique no aparezcan transitorios. El forzamiento de la señal a cero se realiza

multiplicando el registro del tiempo por una función ventana. La más utilizada es la ventana de Hanning.

- Picket-Fence [29]: es el efecto de medir el espectro de la señal para frecuencias discretas, obteniéndose errores tanto en la amplitud como en las frecuencias del espectro a las que se producen. El picket fence por la repetición periódica como consecuencia del muestreo en frecuencia. Su solución se obtiene aplicando una ventana apropiada y aumentando la resolución en frecuencia.

### 2.2.2. Densidad de potencia espectral PSD.

Una vez obtenida la transformada de Fourier, el siguiente paso es calcular la función de densidad espectral de potencia (PSD). Esta función representa la cantidad de energía que hay en cada frecuencia, por lo que se utiliza para comparar las frecuencias entre las señales.

Se puede expresar analíticamente la potencia espectral de una señal finita según la expresión (Ec.7):

$$P = \frac{1}{T} \cdot \sum (x(i)^2) \Delta T = \sum (S(k) \Delta f) \quad (Ec. 7)$$

Donde la densidad espectral es el término  $S(k)$  y la energía se representa siguiendo la expresión (Ec.8):

$$E = \sum (x(i)^2) = \frac{1}{T} \cdot \sum |X(k)|^2 \quad (Ec. 8)$$

De las expresiones anteriores se obtiene la densidad de potencia espectral  $S(f)$  para cada frecuencia. La PSD queda por tanto definida según la expresión (Ec.9):

$$S(f) = \frac{\Delta T}{N} \cdot |X(k)|^2 \quad (Ec. 9)$$

Finalmente, para calcular la PSD a través de la FFT se aplica la ecuación (Ec.10):

$$PSD = \frac{FFT^2}{\Delta f} \quad (Ec. 10)$$

Las gráficas de PSD de las señales obtenidas representan la relación existente entre la frecuencia de rotación del eje y la amplitud de la señal vibratoria en  $V^2/Hz$ . Con estas gráficas es posible diagnosticar de una manera más efectiva los defectos sobre el eje que con la FFT.

### 2.2.3. La transformada de Wavelet

Dado que la transformada de Fourier no es compatible para el tratamiento de señales no estacionarias, surge la transformada de Wavelet (WT). Esto hace que la WT sea una de las técnicas con mayor aplicación en el campo de la detección de fallos o defectos sobre maquinaria, ya que las señales producidas por los defectos a detectar a menudo suelen ser no estacionarias. Esto produce efectos transitorios en la señal que no pueden ser detectados teniendo solo en cuenta el dominio de la frecuencia. Por tanto, la transformada de Wavelet [30] es una herramienta para procesar señales que tienen información tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia.

Al igual que la transformada de Fourier de la señal estudiada se relaciona con una señal senoide mediante unos coeficientes de correlación, la transformada de Wavelet relaciona la señal estudiada con una función denominada Wavelet madre [31] por medio de otros coeficientes de correlación. Entre las Wavelet madre caben destacar la Daubechies, Coiffet, Symlet, Morlet o Meyer.

A la hora de elegir la Wavelet madre hay que tener en cuenta sobre que señal se va aplicar. Ya que no existe ningún criterio estándar para llevar a cabo la elección de la Wavelet madre más adecuada para cada señal, se suele basar esta elección después de aplicar las Wavelet madre en varios ensayos, seleccionando la que mejores resultados aporte.

En el caso de este trabajo, se aplica la Wavelet madre Daubechies 6 o DAUB 6 ya que su aplicación aportó mayor claridad a la hora de interpretar los resultados. Además, en otras líneas de investigación del grupo Maqlab también se usó esta función madre, lo cual respalda su selección.

La transformada de Wavelet [32] se aplica, aparte del análisis local de señales no estacionarias, para el análisis de señales electrocardiográficas, sísmicas, de sonido, de radar, procesamiento de señales y reconocimiento de patrones. Este último uso, el de reconocimiento de patrones, es uno de los objetivos a alcanzar en un futuro, ni más ni menos que el de reconocer patrones de comportamiento que indiquen la presencia de algún defecto a través del estudio de las señales vibratorias producidas por el elemento sometido a estudio.

Mediante la **transformada de Wavelet continua (CWT)** [33] se puede reconstruir la señal en función de la escala y la posición por medio de los coeficientes Wavelet provenientes de la función madre escogida. Si se compara este procedimiento con la transformada de Fourier, la operación es análoga a la descomposición de la señal original en señales sinusoidales mediante la transformada de Fourier, pero en la transformada de Wavelet la señal se descompone en versiones escaladas y desplazadas de la función base-madre escogida previamente.

En la CWT [33] se relaciona el escalado de las Wavelet y la frecuencia de la siguiente manera:

- Escalado pequeño: se corresponde con señales de alta frecuencia donde los detalles cambian rápidamente. La Wavelet esta comprimida para poder captar estas diferencias que varían rápidamente.
- Escalado grande: se corresponden con señales de baja frecuencia en las que las diferencias son lentas y solo pueden ser captadas representando un alto rango de datos por lo que la Wavelet será expandida.

Así pues, se puede definir la transformada discreta de wavelet [33] mediante la ecuación (Ec.11):

$$CWT_{(b,a)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \Psi \cdot \left( \frac{(t-b)}{a} \right) \cdot dt \quad (Ec. 11)$$

Donde se aplican las siguientes funciones:

- La función dilatación o escalonamiento se representa mediante la ecuación (Ec. 12):

$$g_a(t) = g\left(\frac{t}{a}\right) \quad (Ec. 12)$$

- La función traslación se corresponde con la expresión (Ec. 13):

$$g^b = g(t-b) \quad (Ec. 13)$$

- Si se aplican ambas funciones simultáneamente se obtiene la ecuación (Ec. 14):

$$g_a^b(t) = g \cdot \left( \frac{(t-b)}{a} \right) \quad (Ec. 14)$$

- Si la función  $g(t)$  verifica las expresiones (Ec.15) y (Ec. 16):

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(t) dt = 0 \quad (Ec. 15)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} g^2(t) dt = 0 \quad (Ec. 16)$$

Se puede considerar que:

$$g(t) = \psi(t) \quad (Ec. 17)$$

Donde  $\psi(t)$  será la Wavelet madre, obteniéndose la ecuación (Ec. 18):

$$\psi_a^b(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \left( \frac{(t-b)}{a} \right) \quad (\text{Ec. 18})$$

Otra versión de la transformada de Wavelet es la **transformada de Wavelet discreta DWT** [31]. Esta variedad de la transformada de Wavelet elimina los problemas de redundancia y de definición analítica de las funciones wavelet que sufre la transformada de Wavelet continua CWT, por lo que será más eficiente a la hora de realizar los cálculos. Además, dado que las señales vibratorias que se van a estudiar son señales discretas, el uso de la transformada de Wavelet discreta es el más adecuado.

En la transformada discreta de Wavelet se realiza un muestreo que convierte la señal continua en discreta. Dicho muestreo se realiza empleando filtros de paso alto y filtros de paso bajo, mediante los cuales se descomponen las muestras en niveles. El número de muestras  $n$  queda definido mediante la expresión (Ec.19):

$$n = 2^k \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde  $k$  indica los niveles de descomposición, que para este trabajo se utiliza 3, por lo que se obtienen 8 paquetes.

Mediante la transformada discreta de Wavelet [30] se transforma una señal al dominio de la frecuencia y del tiempo aplicando un procedimiento denominado decimado o diezmado, que consiste en realizar una serie de filtrados con filtros de paso alto y filtros de paso bajo. Partiendo de la primera muestra, se aplica un filtro de paso bajo y otro de paso alto estableciendo una frecuencia de corte de acuerdo al teorema de Nyquist [27]. Posteriormente, el resultado obtenido se vuelve a filtrar bajo las mismas características, dando como resultado que la frecuencia de corte del segundo nivel de filtro es la mitad de la máxima frecuencia de la señal que entra en ese nivel de filtrado. De este modo a la salida de cada filtro se genera el doble de las muestras iniciales por lo que la mitad de las muestras están duplicadas, lo que da lugar a que la escala también se duplique. Entonces, a través del decimado se conservan solo la mitad de las muestras, conservando la escala.

En la Figura 6 se puede observar cómo se aplican los filtros de paso bajo y paso alto a una señal, los niveles de descomposición y la especificación del ancho de banda de la señal a la salida de cada nivel.

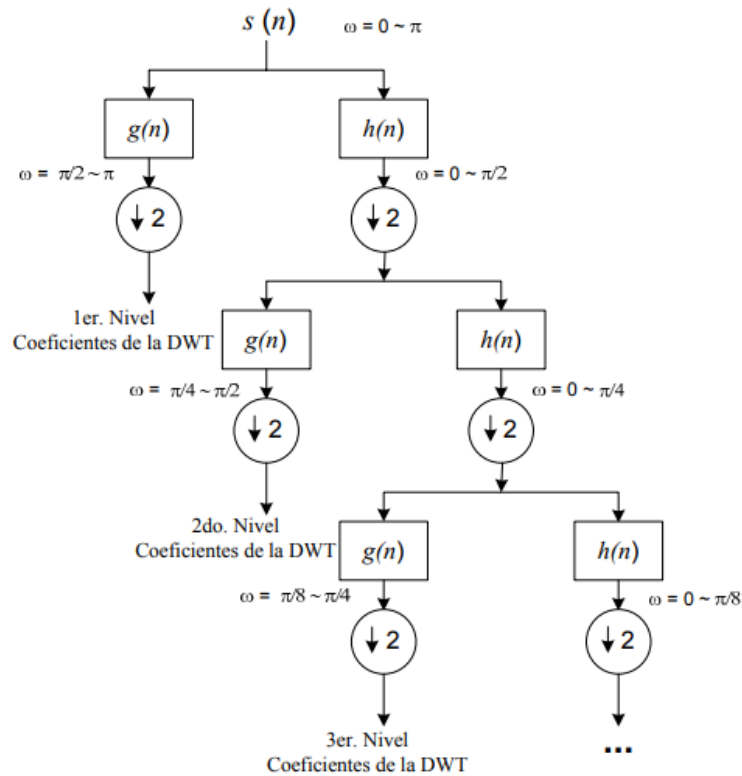


Figura 6. Descomposición de una señal en tres niveles [30]

Conforme se van añadiendo etapas de filtrado se va aumentando el nivel  $k$  de descomposición de la señal, se reduce el ancho de banda de la señal a la mitad, manteniéndose la escala, con lo que la resolución va aumentando conforme se van sumando más etapas de filtrado, añadiendo más niveles de descomposición. Este nuevo método es lo que se denomina **análisis multirresolución** [30]. La señal queda definida a través de una serie de coeficientes obtenidos a través de los filtros de paso alto y paso bajo, los cuales se clasifican de la siguiente manera:

- Coeficientes de detalle  $d$ , se obtienen a la salida de los filtros de paso alto.
- Coeficientes de aproximación  $c$ , se obtienen a la salida de los filtros de paso bajo.

A través del análisis multi-resolución es posible conseguir la resolución deseada, siempre dependiendo esta del nivel de descomposición en el que se encuentre. Sin embargo, este análisis tiene un inconveniente, y es que la información a la salida de los filtros de paso alto se pierde a consecuencia del teorema de Nyquist, que establece que para reconstruir una señal a partir de sus muestras es necesario muestrearla al menos con el doble de la frecuencia de la señal, por lo que se descarta la información a la salida de los filtros de paso alto.

En la Figura 7 y la Figura 8 se pueden apreciar un ejemplo de descomposición de una señal mediante la transformada discreta de Wavelet y análisis multi-resolución:

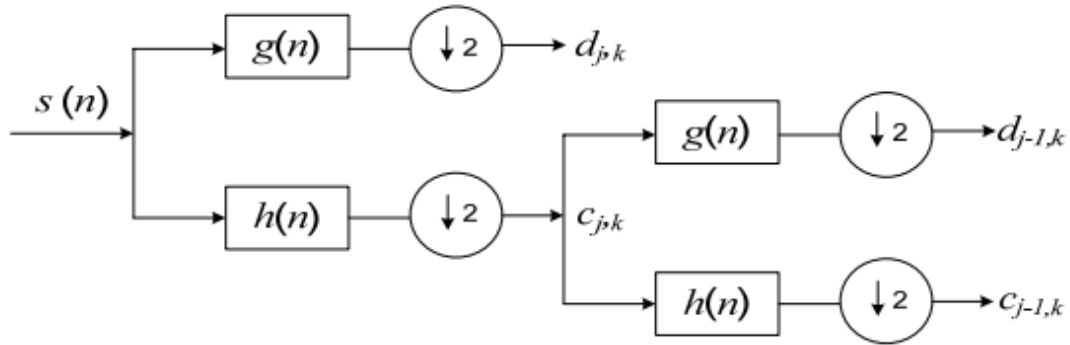


Figura 7. Descomposcion de una señal mediante la transformada discreta de Wavelet [30]

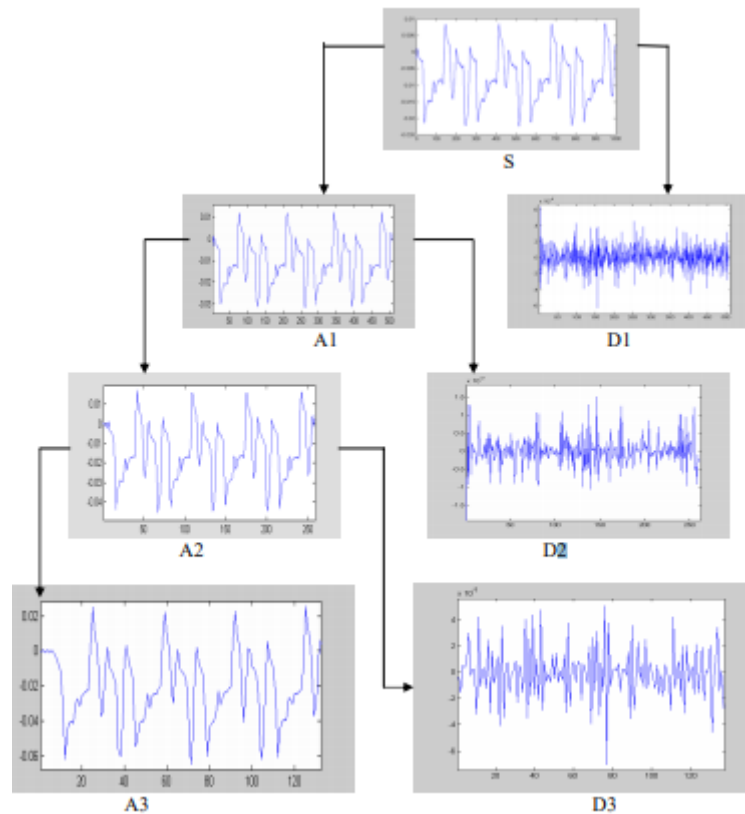


Figura 8. Ejemplo de descomposcion de una señal mediante un analisis multifuncion [33]

### 2.2.3.1. La transformada en paquetes Wavelet

Dado que a través del análisis multi-resolución no se es posible analizar los niveles de frecuencia más elevados, surge la transformada de Wavelet en paquetes WTP. Mediante esta nueva variante de la transformada de Wavelet [22] se puede analizar todo tipo de información, tanto las señales de aproximación como de detalle, descomponiéndose la información hasta el nivel deseado, sin que se pierda la información de las frecuencias más altas, tal y como se puede apreciar en la Figura 9:

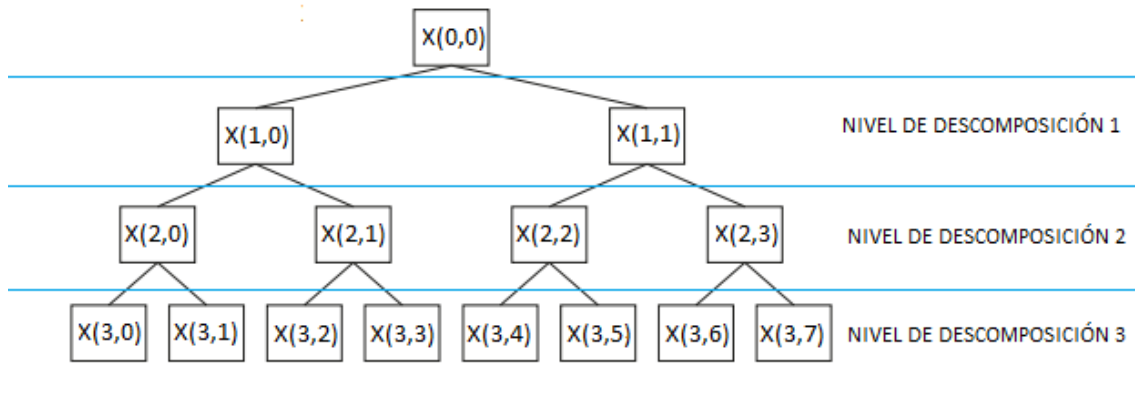


Figura 9. Niveles de descomposicion en la transformada de Wavelet por paquetes

Los coeficientes de cada paquete quedan representados a través de  $X(a,b)$  donde:

- $a$  es el nivel de descomposición de cada paquete.
- $b$  es la ubicación del paquete dentro del nivel de descomposición correspondiente.

El vector formado por los coeficientes de todos los paquetes se puede desarrollar mediante la expresión (Ec. 20):

$$X(a,b) = [x_1(a,b), \dots, x_N(a,b)] = [x_i(a,b)] \quad (\text{Ec. 20})$$

Cada paquete ofrece una determinada resolución en frecuencia en función del nivel de descomposición en el que este se encuentre. La banda de frecuencias representada por cada paquete viene definida a través del teorema de Nyquist, donde se establece que la frecuencia hasta la que se puede reconstruir la señal  $f_N$  es la mitad de la frecuencia de muestreo  $f_s$ . Por tanto, la banda de frecuencias  $f_B$  queda definida a través de la expresión (Ec. 21):

$$f_B = \frac{f_N}{2^k} \quad (\text{Ec. 21})$$

Se debe tener en cuenta que el orden de las bandas de frecuencias de los paquetes no sigue un orden natural. Esto se debe al siguiente hecho explicado a través de un ejemplo sencillo.

Supóngase una señal cuyo rango de frecuencias se encuentra entre  $[0, \pi]$ . En el primer nivel de descomposición, esta señal se dividirá en información de aproximación, cuya banda de frecuencias estará entre  $[0, \pi/2]$ ; y en información de detalle, cuya banda de frecuencias comprenderá el rango  $[\pi/2, \pi]$ . Estas señales deben ser submuestreadas para poder reducir su número de puntos a la mitad, tal y como se explicó durante el análisis multi-resolución. Sin embargo, para poder submuestrear la señal de detalle es necesario transformarla mediante una técnica de simetría especular, con el fin de poder trasladar la señal al origen de coordenadas, por lo que la banda de frecuencias de la señal de detalle pasa a ser  $[\pi$  (estaría en el origen(0)),  $\pi/2$  (que sería  $\pi/2$  también)]. Esto se puede apreciar de manera más clara a través de la Figura 10:



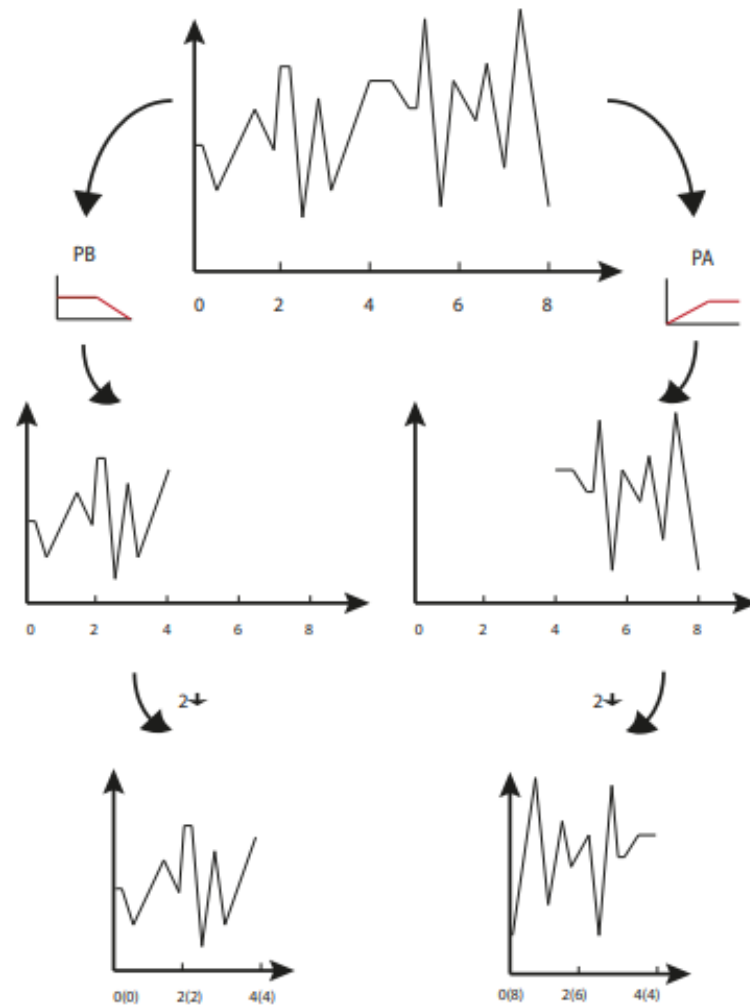


Figura 10. Aplicación de la simetría especular sobre la señal de detalle [22]

Esto hace que cada vez que se descompone una señal de detalle, los dos paquetes resultantes aparecen intercambiados con respecto al orden de frecuencia natural. Por lo tanto, a medida que se avanza añadiendo niveles de descomposición, los paquetes se desordenan de manera progresiva [34]. Esto se aprecia en la Figura 11:

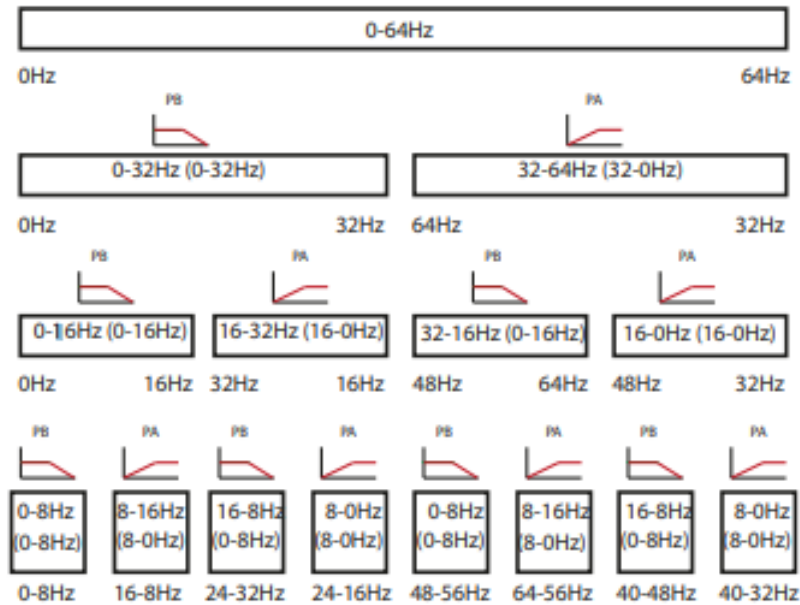


Figura 11. Rango de frecuencias asociados a cada paquete de Wavelet en los tres primeros grados de descomposicion [22]

Uno de los métodos para poder comparar señales a través de WTF es mediante el estudio de la energía almacenada en cada paquete. Se puede definir esta energía  $E(a, b)$  [35] como la suma de los cuadrados de sus coeficientes, tal y como se observa en la expresión (Ec. 22):

$$E(a, b) = \sum_i [x_i(a, b)]^2 \quad (Ec.22)$$

Estos valores de energía se normalizan en base a la energía total de la señal, la cual se calcula sumando las energías de todos los paquetes. Por tanto, la energía total  $E_{TOTAL}$  se calcula a través de la expresión (Ec. 23):

$$E_{TOTAL} = \sum_b E(a, b) \quad (Ec.23)$$

Finalmente, los valores de energía de cada paquete normalizados  $E(a, b_{rel})$  se calculan mediante la expresión (Ec. 24):

$$E(a, b_{rel}) = \frac{E(a, b)}{E_{TOTAL}} \quad (Ec. 24)$$

### 2.3. DEFECTOS EN MÁQUINAS

Este apartado se centra en definir los defectos más comunes que pueden aparecer sobre una máquina rotativa. La mayoría de estos defectos se pueden agrupar en dos clases bien definidas. Por tanto, se pueden clasificar dichos defectos de la siguiente manera:

- **DEFECTOS SOBRE RODAMIENTOS**

Un rodamiento [36] es un cojinete que minimiza la fricción que se produce entre el eje y las piezas que están conectadas a él.

Los rodamientos son elementos mecánicos cuya vida útil depende de una serie de factores como [37]:

- La carga a la que esté sometido, tanto radial como axial.
- La velocidad de trabajo.
- La propia lubricación del rodamiento.
- El proceso de montaje tanto del propio rodamiento como del rodamiento sobre el eje.
- La temperatura de funcionamiento.
- Fuerzas exteriores causadas por desalineaciones, desequilibrios, etc.

Al tratarse de un elemento mecánico muy común a la vez que importante debido a sus propiedades de disipación del rozamiento entre superficies con movimiento relativo entre ellas y su gran capacidad de soportar carga (en función de la carga que reciba el rodamiento se elegirán de un tipo u otro), es necesario tener un control detallado sobre el estado de los rodamientos en todo momento. Por eso se hace necesario la utilización de técnicas modernas de mantenimiento predictivo basadas en el análisis de vibraciones.

El análisis espectral sobre el rodamiento revela el estado de deterioro real de este, con lo que es posible planificar el momento en el cual se deberá producir la intervención de la máquina y la sustitución de los rodamientos afectados.

Los rodamientos están formados por los componentes que se pueden apreciar en la Figura 12:

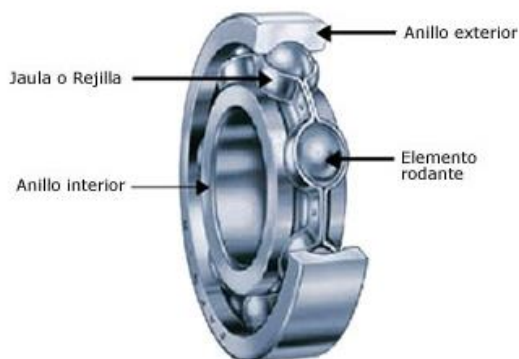


Figura 12. Partes de un rodamiento [38]

Cada uno de estos cuatro componentes que forman un rodamiento puede sufrir deterioro con el paso del tiempo, dando lugar al fenómeno conocido como vibración [37]. Esta vibración emite una señal característica dependiendo del elemento que este deteriorado, por lo que mediante un análisis espectral es posible identificar la presencia de un defecto en el rodamiento, y el componente del rodamiento afectado. A continuación se definen las cuatro posibles frecuencias de deterioro de un rodamiento [37]:

- BPFO (Ball pass frequency of the outer race), es la frecuencia característica de paso de los elementos rodantes por un defecto en el anillo exterior. Físicamente es el número de elementos rodantes que pasan por un defecto de la pista exterior cada vez que el eje realiza un giro completo. Los espectros que indican la presencia de algún defecto se identifican a través de la existencia de picos en los armónicos de la frecuencia característica BPFO, tal y como se observa en la Figura 13.

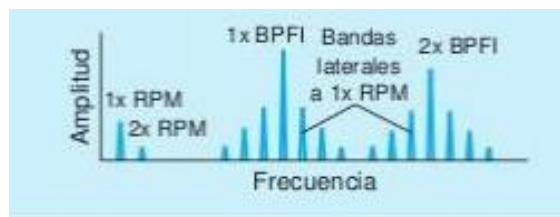


Figura 13. Espectro de frecuencia asociado a BPFO [37]

- BPFI (Ball pass frequency of the inner race), es la frecuencia característica de paso de los elementos rodantes por un defecto en el anillo interior. La presencia de varios picos en los armónicos de la frecuencia BPFI, modulados por bandas laterales a 1 revolución por minuto, indican la existencia de algún defecto en el anillo exterior, tal y como se aprecia en la Figura 14.

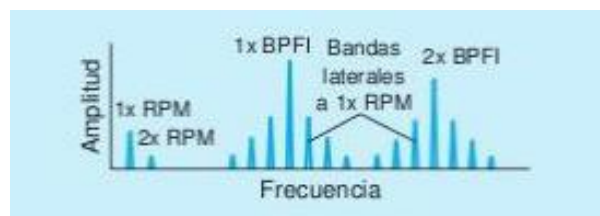


Figura 14. Espectro de frecuencia asociado a BPFI [37]

- BSF (Ball spin frequency): es la frecuencia característica de deterioro en los elementos rodantes. Se identifica con el número de giros que realiza un elemento rodante deteriorado cada vez que el eje realiza un giro completo. Estos defectos son más difíciles de identificar individualmente debido a que en la mayoría de los casos se produce un defecto en los elementos rodantes como consecuencia de algún defecto en cualquiera de los dos anillos. El armónico de mayor amplitud suele indicar el número de elementos rodantes deteriorados. La Figura 15 representa el espectro generado por un defecto en los elementos rodantes.

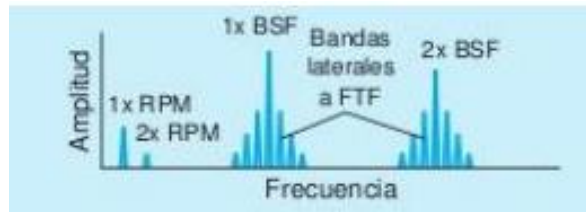


Figura 15. Espectro de frecuencia asociado a BSF [37]

- FTF (Fundamental train frequency): es la frecuencia característica de rotación de la jaula que contiene los elementos rodantes. Se corresponde con el número de giros que realiza la jaula por cada giro completo del eje. En la práctica, un defecto en la jaula normalmente va acompañado por defectos en los anillos. Las FTF suelen modular a las frecuencias de deterioro de los anillos como sumas y/o diferencias de frecuencias, por lo que no se suele asociar a un defecto localizado de manera directa. En la Figura 16 se puede observar un ejemplo del espectro en un rodamiento con defectos en la jaula.

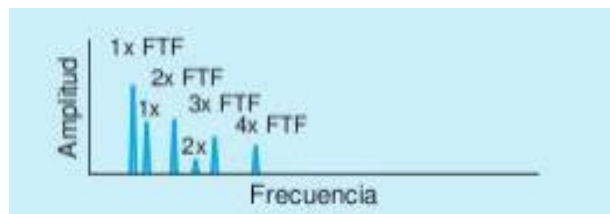


Figura 16. Espectro de frecuencia asociado a FTF [37]

El deterioro en los rodamientos pasa por varias fases antes de alcanzar el fallo final. Estas fases pueden ser clasificadas por medio de un análisis del espectro de frecuencia de la siguiente manera [37]:

- 1ª FASE:

El rodamiento se encuentra “sano”. El espectro solo revela la frecuencia de giro puesto que no existe ningún defecto en el rodamiento. Este espectro queda representado por la Figura 17.

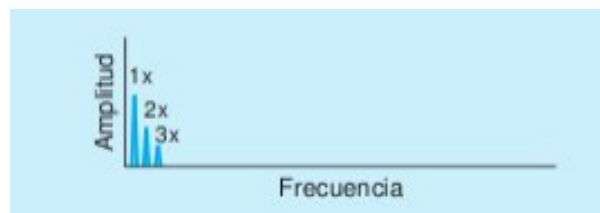


Figura 17. Espectro de frecuencia asociado a la primera fase de deterioro del rodamiento [37]

- 2ª FASE:

Se observan vibraciones a alta frecuencia como consecuencia del inicio del deterioro en el rodamiento. Estas lecturas surgen de los impactos provocados por la aparición de algún

pequeño defecto, dando como resultado la excitación de las frecuencias naturales de los anillos de rodadura. Las medidas se recogen del espectro de aceleración, en una banda de frecuencias comprendida entre 1 kHz y 20 kHz. La Figura 18 representa el espectro característico de la 2ª fase.

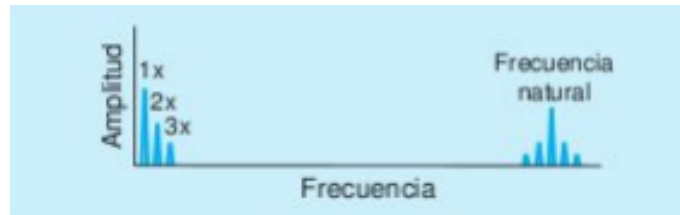


Figura 18. Espectro de frecuencia asociado a la segunda fase de deterioro del rodamiento [37]

- 3ª FASE:

Se aprecian las frecuencias características de los defectos definidos anteriormente (BPFO, BPFI, BSF) y sus armónicos. A medida que los defectos crecen la magnitud de los armónicos de las frecuencias características aumenta. El seguimiento de la evolución de los defectos permite programar la sustitución de los elementos afectados con antelación. Esto se puede ver en la Figura 19.

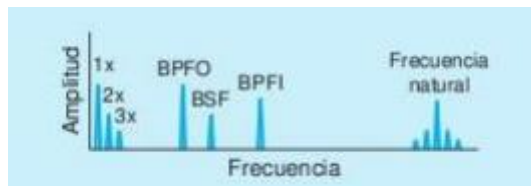


Figura 19. Espectro de frecuencia asociado a la tercera fase de deterioro del rodamiento [37]

- 4ª FASE:

Es la fase final del rodamiento, donde se alcanza la rotura. Se dan la presencia de síntomas similares a roces y holguras. Aparece un ruido de fondo detectable en el espectro de aceleración a alta frecuencia. Aumenta la amplitud a 1 RPM y sus armónicos, mientras que las frecuencias características de fallo desaparecen entre el ruido de fondo. La Figura 20 se corresponde con el espectro de la 4ª fase.



Figura 20. Espectro de frecuencia asociado a la cuarta fase de deterioro del rodamiento [37]

- **DESEQUILIBRIO**

El desequilibrio [39] se produce en los ejes rotativos cuando el centro de giro y el centro de masas no coinciden. Aparece una fuerza centrífuga cuyo valor es proporcional al cuadrado de la velocidad de giro. Se tiene pues, que a mayor velocidad de giro será necesario un equilibrado más preciso.

Es probablemente el fallo más común dentro de una máquina debido a que tanto la inestabilidad aerodinámica o hidráulica como cualquier defecto dentro de la máquina puede ocasionar la aparición del desequilibrio.

Entre las causas que originan el desequilibrio dentro de una máquina se pueden destacar las siguientes [40]:

- Aglomeración desigual de masa en las palas del rotor.
- Erosión o corrosión no simétrica en los alabes de una bomba.
- Errores durante la etapa de fabricación, sobre todo en la falta de homogeneidad en el material como consecuencia de la aparición de burbujas internas, agujeros de soplado, partes porosas, etc.
- Excentricidad del rotor.
- Distribución desigual en las barras del rotor de motores eléctricos o en el bobinado.
- Pesos de equilibrado que faltan.
- Eje flexionado.
- Excentricidad.

En una máquina en la que exista un problema de desequilibrio se podrá observar un aumento de la amplitud de las vibraciones en las medidas radiales, mientras que las medidas de vibraciones axiales pueden permanecer bajas [39].

La detección de un desequilibrio mediante un análisis de las señales de vibración se realiza por medio del estudio de la PSD por medio de una banda frecuencial comprendida en  $0,8x$  y  $1,2x$ , siendo “x” la frecuencia de rotación del eje [39].

La manera de corregir el desequilibrio después de ser este detectado es a través de una compensación de masa en el punto adecuado, logrando el reparto óptimo de masa sobre el eje. El punto óptimo se puede localizar a través de un analizador de vibraciones [39].

- **DESALINEACION**

La desalineación es uno de los problemas de vibraciones más común dentro de las máquinas rotativas y se debe principalmente a la dificultad que presenta el hecho de alinear dos ejes rotores con sus respectivos apoyos [41].

El origen del problema de la desalineación es muy variado, si bien se puede resumir su origen a través de los siguientes puntos:

- Excesiva confianza en elementos como acoplamientos elásticos o rodamientos auto-alineables.
- Distorsiones en la maquina durante su funcionamiento que produce el desplazamiento bien del eje conductor o del eje conducido.
- Insuficiente precisión a la hora de realizar la alineación entre ejes.

Se puede diagnosticar la desalineación en una maquina a través del análisis del espectro de frecuencias, en concreto estudiando los picos en los primeros tres armónicos de la frecuencia de giro, los cuales delatarían la presencia de desalineación axial; o bien estudiando los dos primeros armónicos de la frecuencia de giro para el caso de desalineación radial.

En algunos casos, la vibración debida a la desalineación se hace patente en el primer armónico de la frecuencia de giro, lo cual conlleva un problema a la hora de la detección, ya que este armónico coincide con la detección de desequilibrio. En este caso, se debe realizar un análisis complementario de fase, donde es posible distinguir entre los problemas de desalineación y de desequilibrio.

- **HOLGURAS**

El origen de las holguras mecánicas es muy variado. Una holgura [42] puede surgir por falta de apriete, aumento de las tolerancias producido por el desgaste, etc. Además, se puede dividir las holguras mecánicas en dos tipos: holguras de elementos rotativos y holguras estructurales.

- **Holguras de elementos rotativos [42]:**

Este tipo de holguras se da en elementos como rodamientos, cojinetes de fricción, acoplamientos, ejes motrices, etc. Se pueden identificar estudiando el espectro de frecuencias, observando los armónicos de la frecuencia de giro del eje motriz, en concreto, los armónicos (1x, 2x, 3x, etc.), los sub-armónicos (0,5x) y las combinaciones entre ambos denominadas medios armónicos (1,5x; 2,5x; 3,5x, etc.).

Conforme el desgaste aumenta, el espectro de frecuencias varia. Esto permite realizar una clasificación del grado de severidad de la holgura de la siguiente manera [42]:

- **Holgura incipiente:** se detecta a través de los primeros cinco armónicos de la frecuencia de giro, observándose que los armónicos superiores tienen menos amplitud.
- **Holgura potencialmente seria:** la amplitud del primer armónico de la frecuencia de giro se incrementa. Se observa la aparición de medios armónicos.
- **Holgura seria:** incremento de la amplitud de los armónicos y medios armónicos.
- **Holgura severa:** se detecta por la presencia tanto de los armónicos, como de los medios armónicos y sus armónicos de la frecuencia de giro, de tal manera que se aprecia una banda ancha de frecuencias, tal y como se puede apreciar en la Figura 21:



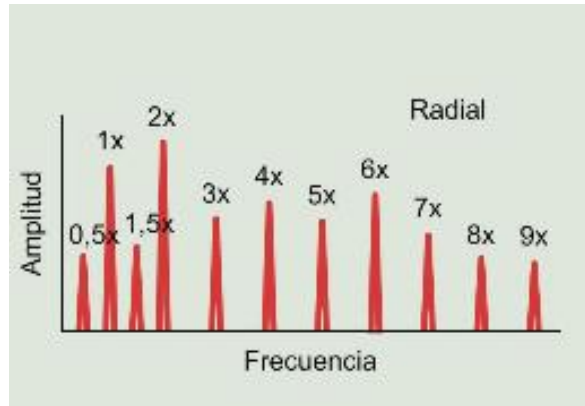


Figura 21. Espectro de frecuencias asociado a la holgura de elementos rotativos [42]

- **Holguras estructurales [42]:**

Son las holguras propias de los elementos no rotativos de la máquina: puntos de anclaje, uniones, soportes de rodamientos, etc.

Este tipo de holgura se detecta observando los armónicos de la frecuencia de giro (1x, 2x, 3x, etc.). El procedimiento llevado a cabo suele ser la comparación de los espectros de frecuencia entre dos elementos entre los que se quiere analizar si existe holgura. Así pues, se obtienen las lecturas de las señales de vibración y fase en esos dos elementos en todas las direcciones posibles (axial, radial) y después de compararlas se llegan a dos posibles conclusiones [42]:

- Si los espectros obtenidos para una misma dirección coinciden en amplitudes y armónicos, y las lecturas de fase son idénticas, esto indica que existe una unión correcta entre ambos elementos.
- Si por el contrario, las lecturas no coinciden y hay diferencias importantes entre las lecturas de fase de ambos elementos, esto indica que la unión entre ambos componentes es defectuosa, apareciendo la holgura estructural.

• **FISURA LATERAL EN EJES**

La fisura lateral es el objeto de este trabajo, para ello es necesario recopilar otros estudios previos.

En primer lugar hay que conocer que la presencia de una fisura en un eje [43] puede cambiar la disposición de las masas de este, por lo que la vibración del eje se vería afectada aumentando está con la presencia de la fisura, lo cual, en teoría, sería detectable mediante un análisis de vibraciones. Al aparecer una grieta sobre el eje este pierde rigidez produciéndose un desequilibrio, tal y como se explicó anteriormente.

Hay estudios [44] que afirman que las grietas perpendiculares a la dirección axial “respiran” con la misma frecuencia que la frecuencia de rotación y las frecuencias que más cambios experimentan cuando se produce una fisura son las conocidas como armónicos, en concreto el primer armónico “1x” y el segundo armónico “2x”, siendo “x” la frecuencia de rotación. A estas frecuencias la energía de la señal vibratoria aumenta como consecuencia de la fisura.

Otros estudios [45] consideran que son el segundo armónico “2x” y el tercer armónico “3x” las componentes más útiles para detectar la presencia de este tipo de defectos.

Los estudios más recientes como el [46] muestran, en la práctica, que los datos obtenidos en un banco de ensayos muestran un gran incremento de energía en las zonas cercanas al tercer armónico.

### 3. SISTEMA EXPERIMENTAL

En este apartado se detallan los medios necesarios para poder llevar a cabo el análisis de las señales de vibración emitidas por un eje sobre el que posteriormente se le realiza una hendidura o fisura de profundidad variable, con el fin de detectar la presencia de dicha fisura a través de las técnicas de procesamiento de señales descritas en el apartado anterior. También se especifican las condiciones de seguridad a tener en cuenta a la hora de realizar las mediciones.

#### 3.1. MÁQUINA DE ENSAYO-ROTOKIT

La máquina utilizada para ensayar el eje en el laboratorio es la denominada “Rotokit”. Esta máquina suministrada por la empresa SpectraQuest Inc. permite realizar simulaciones sobre elementos rotativos con el fin de poder investigar los posibles indicadores de defectos que puedan aparecer sobre dichos elementos rotativos. Por tanto, es válida para ensayar tanto ejes como rodamientos, engranajes, etc.

El Rotokit consta de una serie de partes definidas a continuación:

- **Motor:** es la fuente de energía mecánica necesaria para realizar el ensayo.
- **Regulador de velocidad:** elemento a través del cual es posible arrancar y para el sistema de movimiento rotativo, así como regular la velocidad del mismo.
- **Acoplamiento:** es el enganche entre el eje del motor y el eje a ensayar.
- **Rodamientos:** son los encargados de reducir la fricción existente entre el eje y los acoplamientos.
- **Pletinas o soportes:** elementos de apoyo donde se alojan los rodamientos. Los puntos de alojamiento de los rodamientos están diseñados de manera que el eje a ensayar quede alineado con el eje del motor.
- **Eje de ensayo:** fabricado en acero mediante un torno, este eje será el utilizado durante la toma de medidas. En el anexo X se muestra un plano con las medidas suministradas al operario que torneó el eje para poder acoplarlo al Rotokit.

En la Figura 22 se puede observar el sistema del Rotokit completo:

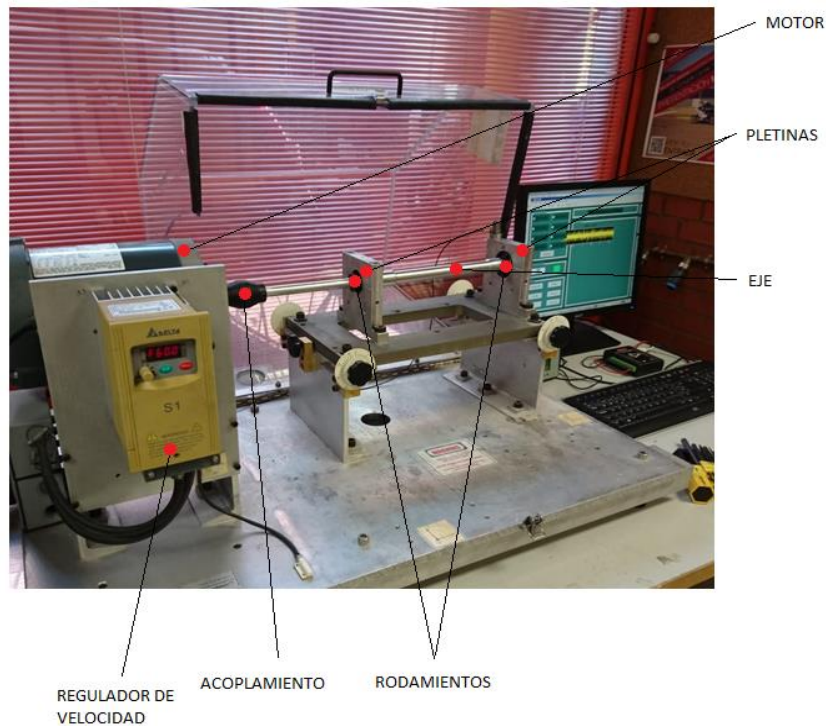


Figura 22. Sistema Rotokit y partes del mismo

### 3.2. GRUPO DE MEDIDA

El proceso de adquisición de datos se realiza por medio de una serie de elementos a través de los cuales se pueden recoger, analizar y almacenar las señales vibratorias suministradas por el eje de manera digital. Estos elementos quedan definidos a continuación:

- **Acelerómetro o transductor:**

Este elemento transforma la señal vibratoria que recibe en una señal eléctrica analógica [47]. El acelerómetro empleado es un acelerómetro uni-axial piezoeléctrico. Este tipo de transductor mide las vibraciones en una dirección y abarcan un amplio rango de frecuencias de vibraciones, por lo que es ideal para poder realizar el ensayo tanto a baja frecuencia como a alta.

Su funcionamiento reside en el desplazamiento de una masa interna que comprime un elemento piezoeléctrico. En función de la vibración que esta masa reciba, el acelerómetro emitirá una carga eléctrica proporcional a la compresión del elemento piezoeléctrico [47].

El acelerómetro empleado durante el ensayo es el proporcionado por la empresa Brüel&Kjaer (ver Figura 23), en concreto el modelo 4383, cuyas características quedan resumidas en la Tabla 2:



Figura 23. Acelerómetro Brüel&Kjaer modelo 4383 [48]

<b>Sensibilidad de carga (<math>\frac{pC}{ms^{-2}}</math>)</b>	<b><math>3,16 \pm 2\%</math></b>
<b>Rango de frecuencia de funcionamiento (Hz)</b>	<b>0 – 8400</b>
<b>Sensibilidad transversal máxima (%)</b>	<b>&lt; 4%</b>
<b>Resistencia al aislamiento a 20°C (GΩ)</b>	<b>20</b>
<b>Frecuencia de resonancia (kHz)</b>	<b>28</b>
<b>Nivel de ruido residual en el rango de frecuencias (mg)</b>	<b>0.06</b>

Tabla 2. Características principales del acelerómetro Brüel&Kjaer modelo 4383 [49]

El nexo de unión entre el acelerómetro y el sistema Rotokit se realiza por medio de un imán que incluye el acelerómetro. La ubicación del acelerómetro se colocó en uno de los tornillos de amarre del conjunto pletina-rodamiento, es decir, en el soporte más cercano a la fisura, y por tanto, más lejano del motor, de tal manera que se así se evitaban en la medida de lo posible los ruidos producidos por el motor.

- **Acondicionador de señales:**

La salida del acelerómetro se conecta con un elemento capaz de amplificar la señal que el acelerómetro emite, denominado acondicionador de señal.

El acondicionador usado durante el ensayo se corresponde con el modelo Nexus 2693, también de la marca Brüel&Kjaer (ver Figura 24). Este acondicionador se configura acorde a las características del acelerómetro. Uno de los parámetros detallados en el acondicionador es la sensibilidad de carga del acelerómetro (ver Tabla 3).



Figura 24. Acondicionador de señales modelo Nexus 2693, Brüel&Kjaer [50]

Las características del acelerómetro Nexus 2693 se recogen la Tabla 3:

<b>Ganancia del amplificador (<math>mV/pC</math>)</b>	<b>0,1 – 10000</b>
<b>Filtro paso alto (–10%)(Hz)</b>	<i>Aceleración: 0,1; 1 o 10Hz</i>
	<i>Velocidad: 1 o 10 Hz</i>
	<i>Desplazamiento: 1 o 10 Hz</i>
<b>Filtro paso bajo (–10%)(Hz)</b>	0,1; 1; 3; 10; 22,4; 30 o 100 kHz <i>Pendiente de atenuacion: 40 dB/dec</i>
<b>Rango de frecuencia (–10%)(Hz)</b>	<i>Aceleración: 0,1Hz – 100kHz</i>
	<i>Velocidad: 1 Hz – 1 kHz</i>
	<i>Desplazamiento: 1 Hz – 1 kHz</i>
<b>Sensibilidad del transductor (<math>C/ms^{-2}</math>)</b>	$10^{-19} – 10^{-6}$

Tabla 3. Características principales del acondicionador de señales modelo Nexus 2693, Brüel&Kjaer [51]

- **Tarjeta de adquisición de datos:**

A la hora de poder interpretar los datos en un ordenador mediante el software correspondiente, es necesario transformar la señal analógica a la salida del acondicionador de señales a digital. Esto se realiza a través de una tarjeta de adquisición de datos.

En este ensayo se ha empleado el modelo KUSB-3100 de la marca Keithley de 16 canales (ver Figura 25).

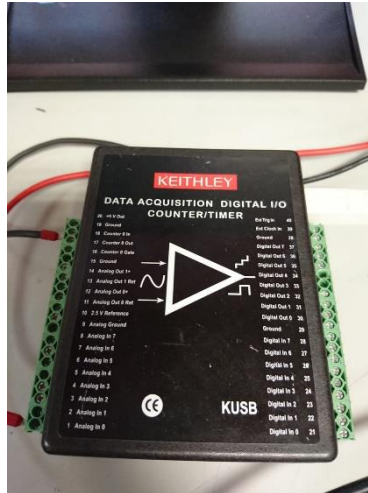


Figura 25. Tarjeta de adquisicion de datos KUSB-3100 Keithley.

Sus características principales se resumen en la Tabla 4:

Número de canales	8 canales de entrada
	8 canales de salida
Rango de voltaje de salida (V)	[−10,10]
Número de bits	12

Tabla 4. Características principales de la tarjeta de adquisicion de datos KUSB-3100 Keithley [52]

- **Software de adquisición de datos:**

Los datos proporcionados por la tarjeta de adquisición de datos se envían al ordenador donde son recibidos, procesados y almacenados gracias al programa Matlab, en concreto a una de las herramientas de este programa denominada Btool [53].

A continuación se explica cómo se ha realizado a través de la herramienta Btool la adquisición de los datos.

- En primer lugar, se debe seleccionar la tarjeta de datos con la que se trabaja tal y como se muestra en la Figura 26, que en este caso es la descrita anteriormente.

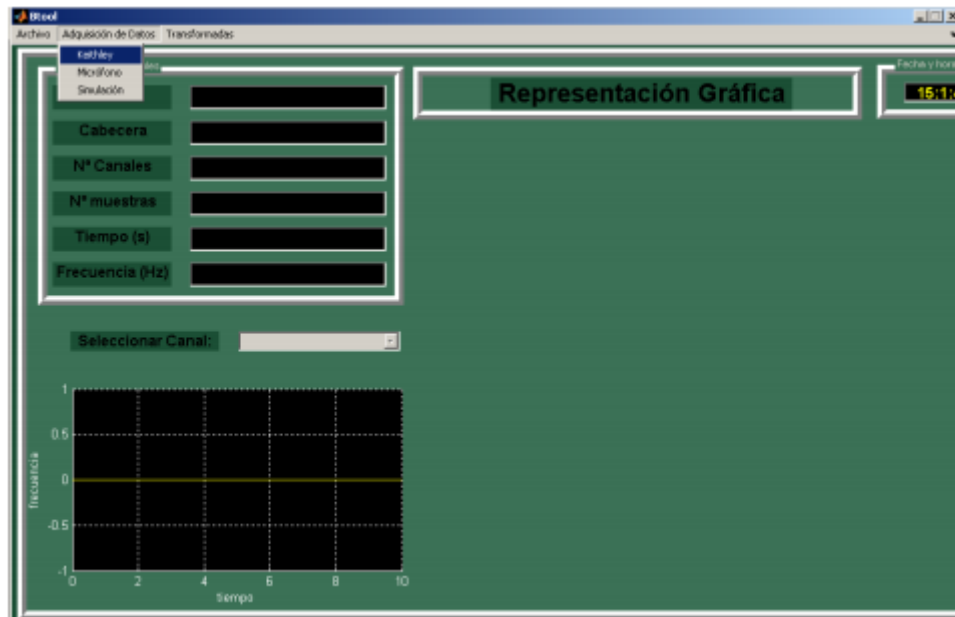


Figura 26. Selección de la tarjeta Keithley

- Después hay que seleccionar el número de canal de salida de la tarjeta de datos que está conectado al programa, que en este ensayo se corresponde al Canal 1. En la misma ventana donde se selecciona el canal, se pueden fijar los valores necesarios para realizar las medidas, como el número de ciclos de medida, el tiempo entre ciclos, etc. Sin embargo, existe una opción para autocompletar estos valores en función de la tarjeta seleccionada y usada, tal y como se puede apreciar en la Figura 27:

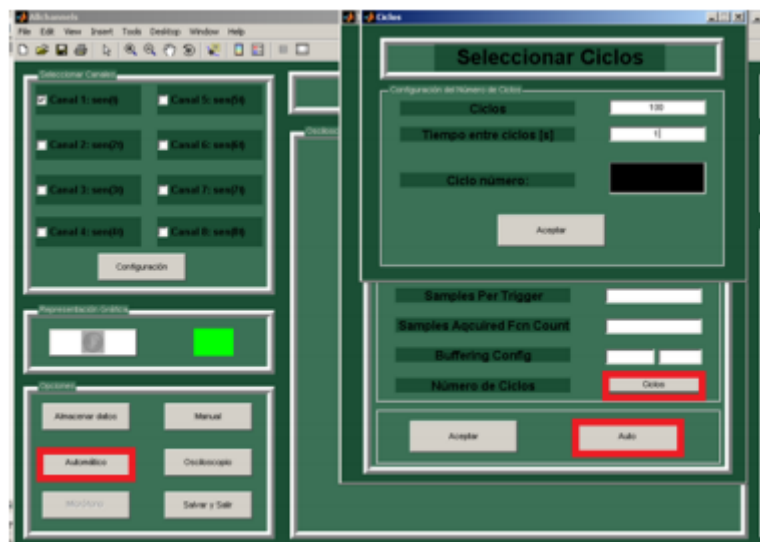


Figura 27. Selección de los parámetros necesarios para recibir las medidas

- Una vez que el programa ha conectado con la tarjeta y los valores han sido establecidos comienza el proceso de medida. El programa, una vez iniciado este proceso, muestra el ciclo actual de medida en tiempo real hasta que termina el proceso de medida. Esto se muestra en la Figura 28.



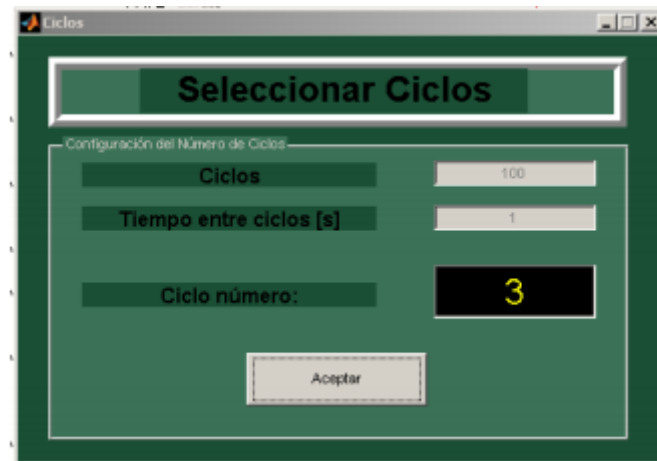


Figura 28. Visualización de los ciclos de medida en tiempo real

### 3.3. PROCESO DE GENERACION DE LAS SEÑALES VIBRATORIAS

Una vez se finaliza con el proceso de configuración del software de adquisición de datos, hay que generar las señales vibratorias a estudiar. Como se ha mencionado anteriormente, esto se hace a través de la máquina Rotokit. El proceso llevado a cabo se puede dividir en las siguientes etapas:

- Se acopla el eje al Rotokit mediante el acoplamiento y las pletinas, tal y como se observa en la Figura 22.
- Se cierra la cubierta de seguridad.
- Se conecta el Rotokit a una fuente de energía.
- Se pulsa el botón “STOP” del regulador de velocidad para iniciar la máquina (ver Figura 29).



Figura 29. Regulador de velocidad

- Se ajusta la velocidad al mínimo mediante el regulador.
- Se pulsa el botón “RUN” para arrancar el motor.

- Se regula la velocidad de giro del motor a la deseada para realizar el ensayo mediante el regulador.
- Una vez finalizado el proceso de toma de datos, se pulsa el botón “STOP” para detener el motor.

### 3.4. PROCESO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

En este apartado se va a proceder a explicar el procedimiento llevado a cabo a la hora de realizar la toma de datos, así como se ha elegido una frecuencia de muestreo óptima para realizar este ensayo.

#### - Frecuencia de muestreo:

A la hora de seleccionar la frecuencia de muestreo, se debe tener en cuenta la frecuencia máxima a la que se desea realizar el análisis. En primer lugar, observando la Tabla 3 del elemento acondicionador, se aprecia que el filtro antialiasing mayor que se puede usar es de 3kHz, por lo que la frecuencia de muestreo seleccionada será de 6kHz. Este filtro antialiasing es un filtro de paso bajo que elimina todas las frecuencias superiores a la mitad de la frecuencia de muestreo. Esto se realiza en base al teorema de Nyquist, mediante el cual se establece la frecuencia mínima necesaria para reproducir una señal de manera exacta [27].

En resumen, seleccionando una frecuencia de muestreo de 6000 kHz, la frecuencia de corte a través del filtro de paso bajo es de 3000 kHz, por lo que solo se analizará la información contenida entre 0,1 y 3000 Hz, sin que se pierda información.

Para cada señal se recogen 16384 puntos ( $2^n$  puntos siempre) debido al efecto leakage comentado anteriormente. El tiempo de muestreo es definido en función de la frecuencia de muestreo seleccionada. En este caso el tiempo de muestreo  $t_{muestreo}$  es, según (Ec.25):

$$t_{muestreo} = \frac{1}{f_{muestreo}} = \frac{1}{6000} s \quad (Ec. 25)$$

Se puede definir el tiempo de adquisición  $t_{adquisición}$  como (Ec.26):

$$t_{adquisición} = \frac{N^o \text{ puntos}}{f_{muestreo}} = \frac{16384}{6000} = 2,73 s \quad (Ec. 26)$$

A la hora de seleccionar el número de ciclos de medida, es necesario calcular el error de medida [54] asociado a este valor  $Error(\%)$ , el cual se puede calcular con la expresión (Ec. 27):

$$Error(\%) = \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot 100 \quad (Ec. 27)$$

Donde N es el número de ciclos de muestra.

Por tanto, se observa que cuanto menor es  $N$  mayor es el error generado durante el proceso de medida. A continuación se va a proceder a calcular el error para  $N = 10$  ciclos (Ec.28) y para  $N = 100$  ciclos (Ec.29):

$$N = 10 \rightarrow Error = \sqrt{\frac{2}{10}} \cdot 100 = 44,72\% \quad (Ec. 28)$$

$$N = 100 \rightarrow Error = \sqrt{\frac{2}{100}} \cdot 100 = 14,14\% \quad (Ec. 29)$$

Con este ejemplo, se aprecia que el error disminuye conforme aumenta  $N$ .

En este trabajo, el número de ciclos seleccionado es 100, ya que se asume que un error del 14% es aceptable (en base al tiempo disponible para realizar los ensayos).

- **Procedimiento para la toma de datos:**

El proceso seguido a la hora de realizar la toma de datos durante el ensayo es el siguiente:

1. Se acopla el eje al Rotokit, comprobando que todo esté bien ajustado y que todos los elementos están conectados como deben.
2. Se verifica que la posición del acelerómetro es la adecuada, tal y como se ha explicado anteriormente.
3. Se cierra la carcasa de seguridad.
4. Se conectan los elementos a la fuente de alimentación.
5. Se inicia el sistema motriz (motor) y se selecciona la frecuencia de giro deseada.
6. Mientras la máquina alcanza el régimen permanente, se comprueban los parámetros introducidos en el acondicionador y en el software Btool.
7. Se realiza el proceso de adquisición de medidas.
8. Una vez se han tomado las medidas para la primera velocidad, que en este estudio se corresponde con 20 Hz, se cambia la velocidad a la siguiente a la cual se quiere realizar el análisis, lo cual sería a 40 Hz, y se repite el paso 6 y 7.
9. Una vez se han recogido los datos para el caso de eje sano para las tres frecuencias de giro seleccionadas (20 Hz, 40 Hz, 60 Hz), se para la máquina, se abre la carcasa de seguridad, se retira el acelerómetro, y se realiza la fisura sobre el eje. La profundidad de la fisura se irá variando con el fin de analizar las vibraciones emitidas por el eje en función de la profundidad de la fisura. Las profundidades de fisura realizadas sobre el eje se muestran en la tabla x:
10. Una vez practicada la fisura se realizan los pasos 1-9 hasta realizar el análisis con la última profundidad de fisura.
11. Finalmente, tras finalizar el procedimiento de medida, se apagan todos los sistemas.

### 3.5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se ensaya un eje de diámetro 20,77 mm (ver Anexo A). La fisura se realiza en un lateral, cerca de uno de los apoyos de la máquina, en concreto el lateral más alejado del motor para evitar ruidos del mismo en las señales vibratorias.

Para realizar los defectos sobre el eje, se utilizó una sierra como elemento de desbaste, y un calibre o pie de rey para medir la profundidad de cada nivel de defecto, tal y como se puede apreciar en la Tabla 5:

<i>Nº de defecto</i>	<i>Profundidad fisura (%)</i>	<i>Profundidad fisura (mm)</i>
<b>0</b>	0	0
<b>1</b>	4,15	0,86
<b>2</b>	8,3	1,72
<b>3</b>	12,5	2,59
<b>4</b>	16,65	3,46
<b>5</b>	22,15	4,6
<b>6</b>	25	5,17
<b>7</b>	33,25	6,91
<b>8</b>	41,65	8,65
<b>9</b>	50	10,385

*Tabla 5. Profundidad de la fisura en cada nivel de defecto*

Por cada nivel de defecto se realizaban tres medidas correspondientes a las tres frecuencias de giro a las cuales se realizó el ensayo. Una vez realizadas estas tres medidas, se desacoplaba el eje del Rotokit y se le practicaba una nueva profundidad de defecto estipulada en la Tabla 5.

Las medidas adquiridas durante este procedimiento se muestran en el siguiente apartado.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se va a proceder a mostrar los resultados experimentales obtenidos durante las mediciones de las señales de vibración producidas por un eje sano a tres frecuencias de giro: 20 Hz, 40Hz y 60 Hz. Posteriormente sobre el eje se tallo una fisura de profundidad variable, recogiendo la misma cantidad de muestras por cada profundidad de fisura.

Las señales de vibración obtenidas fueron tratadas por medio de las técnicas de procesamiento de señales descritas en esta memoria en el apartado 2, en concreto la transformada rápida de Fourier FFT, la función de densidad de potencia espectral PSD y la transformada de Wavelet en paquetes WTP. Primero se obtuvo la transformada rápida de Fourier como paso previo para obtener la función de densidad de potencia espectral. A través de la FFT es complicado realizar un análisis comparativo entre señales, pero usando la PSD es más viable poder encontrar diferencias en los picos de las señales procesadas. Finalmente se obtuvieron los paquetes de Wavelet. En ellos se puede apreciar como varia la energía del sistema en función de la energía contenida en cada paquete, el cual se asocia a un rango de frecuencias determinado.

La manera de proceder será la de comparar las señales proporcionadas por el eje sano con las proporcionadas con el eje con fisura con el fin de detectar algún indicativo, a través de la PSD o WTP, de la existencia de una fisura en nuestro eje.

A continuación se muestran los espectros de frecuencia obtenidos.

### 4.1. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE PSD

En este apartado se muestran los espectros de frecuencia obtenidos a través de la PSD. Primero se representan los del eje sano y a posteriormente los espectros de la fisura a cada uno de los 9 niveles de profundidad, partiendo de un nivel del 4,15% del diámetro del eje hasta el 50% del mismo. Tanto de eje sano, como en cada nivel de profundidad de grieta se obtienen tres gráficas, cada una obtenida a una velocidad de giro distinta, tal y como se explicó anteriormente.

En estos espectros que se muestran a continuación se pueden identificar las frecuencias armónicas de la frecuencia de giro y la amplitud de los mismos.

#### 4.1.1. PSD SOBRE EJE SANO

A continuación se muestran las gráficas PSD obtenidas para el eje sano a cada frecuencia de rotación ensayada (ver Figuras 30, 31 y 32).

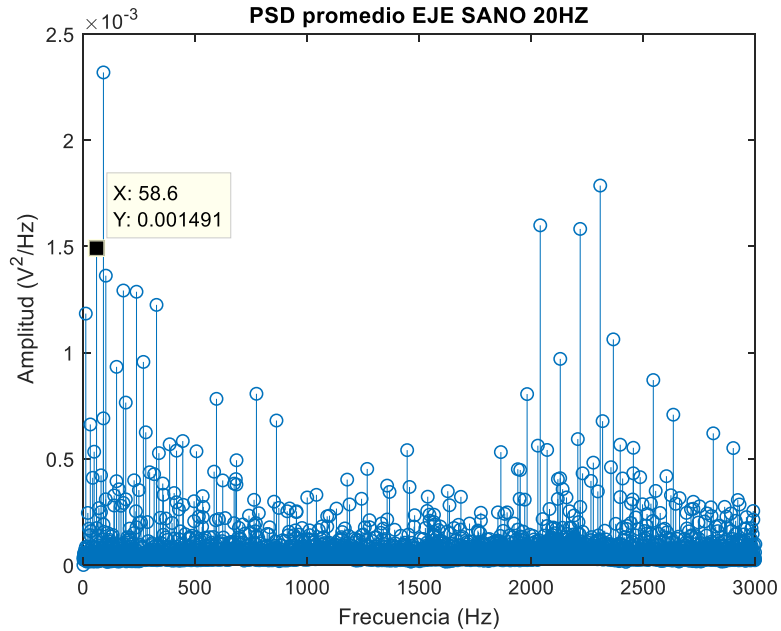


Figura 30. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje sano a 20 Hz

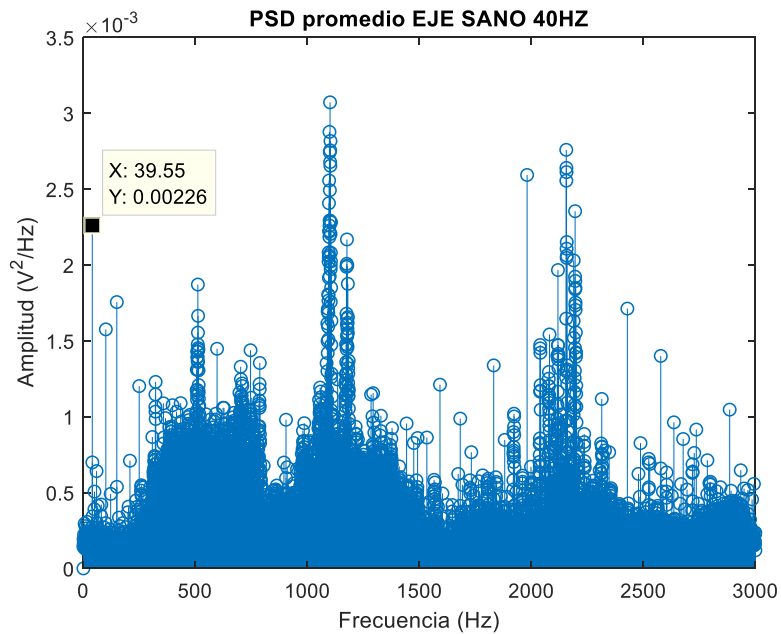


Figura 31. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje sano a 40 Hz

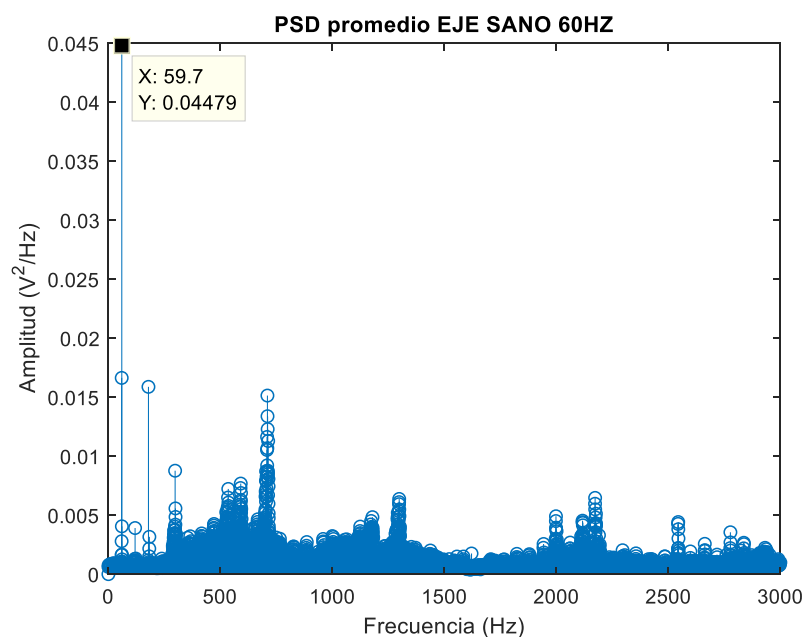


Figura 32. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje sano a 60 Hz

#### 4.1.2. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 4,15%

A continuación se muestran las gráficas PSD obtenidas para el eje con el nivel de defecto 1, según la Tabla 5, a cada frecuencia de rotación ensayada (ver Figuras 33, 34 y 35).

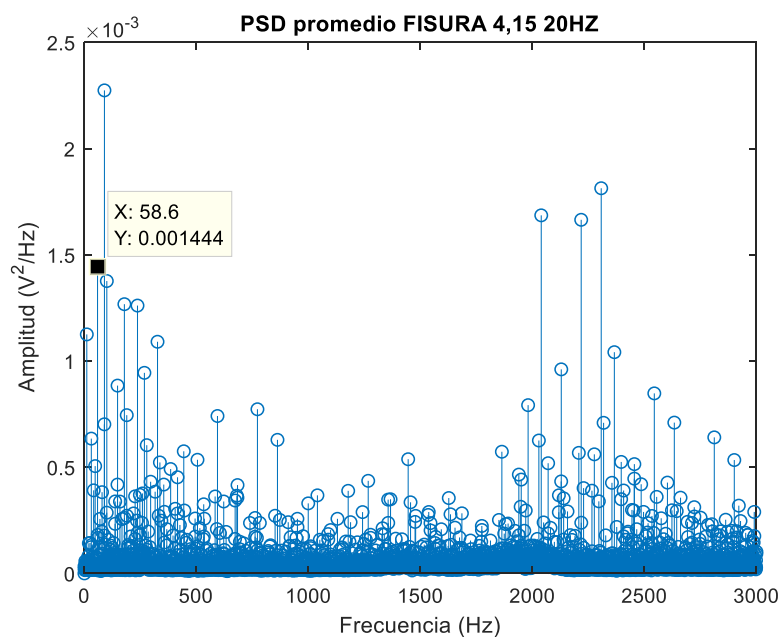


Figura 33. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 4,15% a 20 Hz

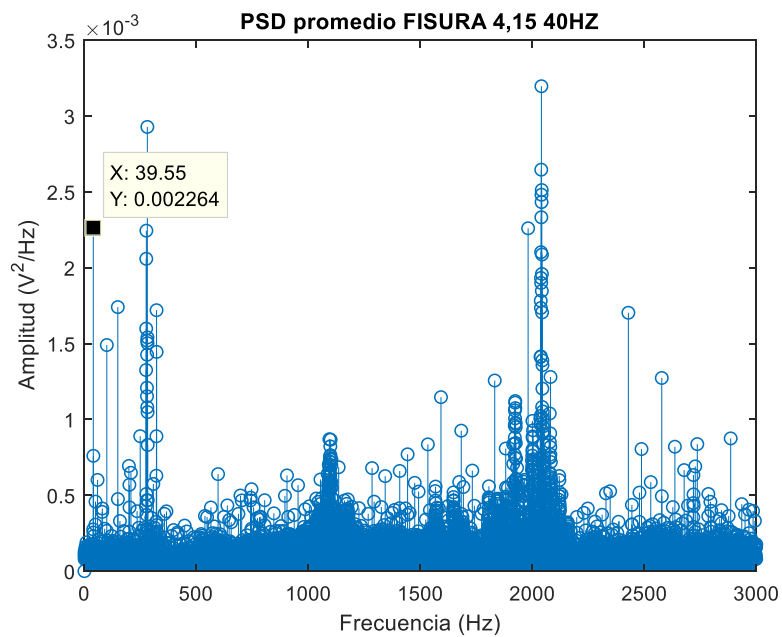


Figura 34. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 4,15% a 40 Hz

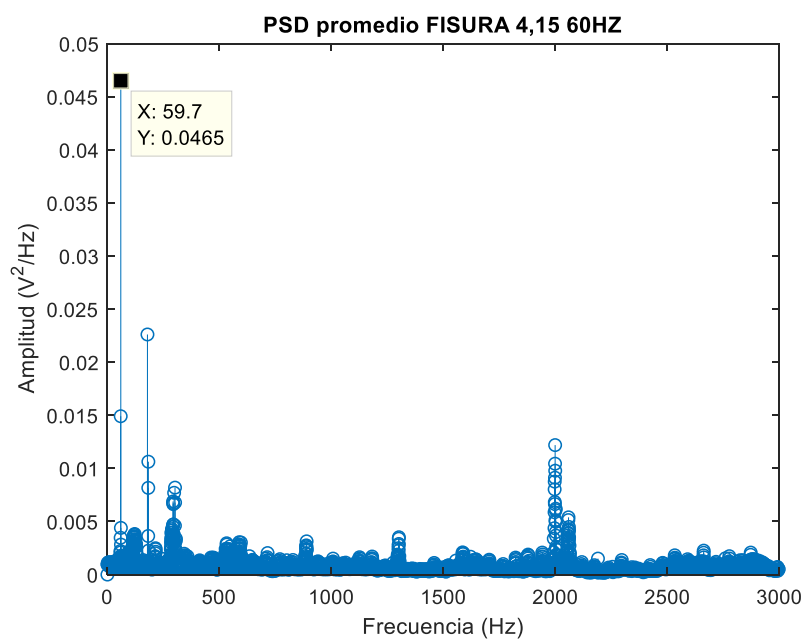


Figura 35. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 4,15% a 60 Hz



#### 4.1.3. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 8,3%

A continuación se muestran las gráficas PSD obtenidas para el eje con el nivel de defecto 2, según la Tabla 5, a cada frecuencia de rotación ensayada (ver Figuras 36, 37 y 38).

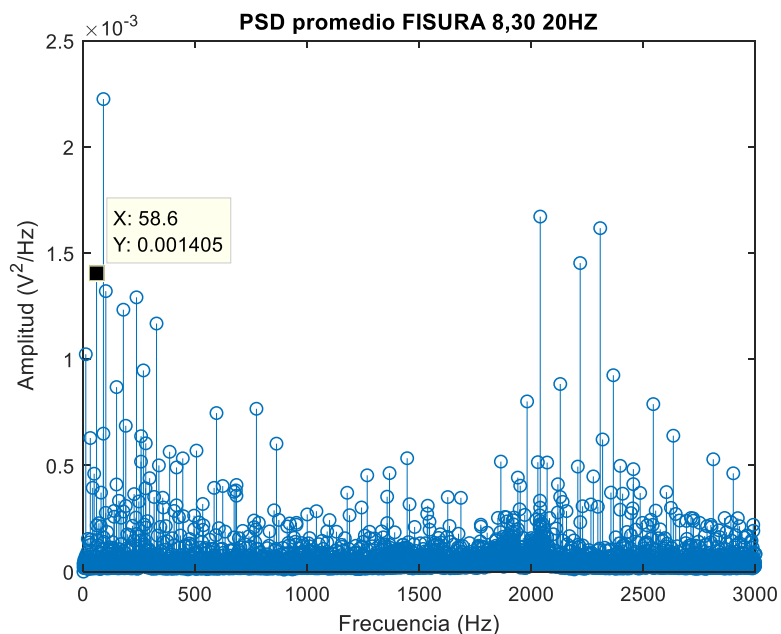


Figura 36. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 8,30% a 20 Hz

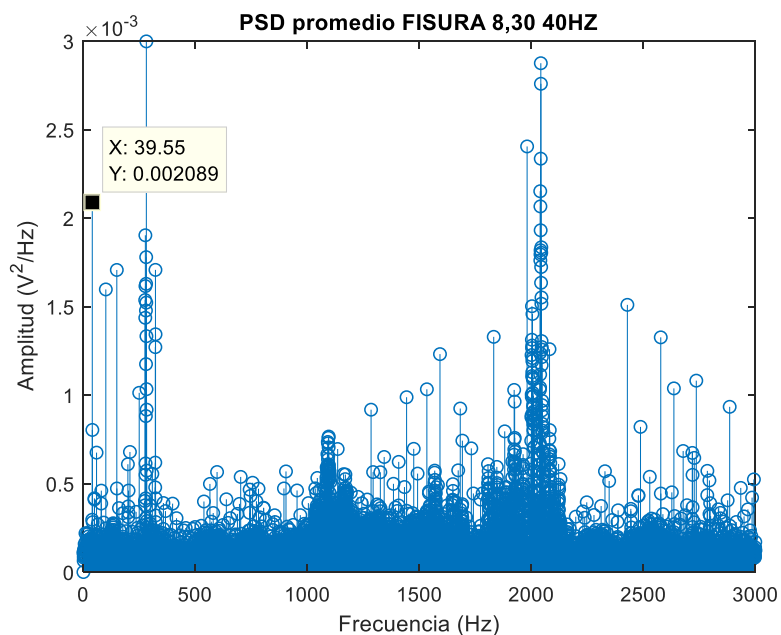


Figura 37. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 8,30% a 40 Hz

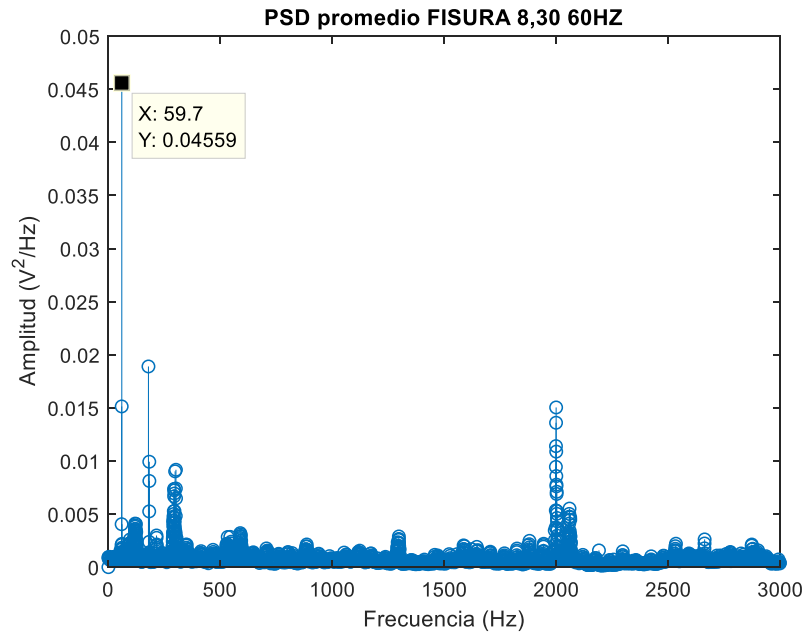


Figura 38. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 8,30% a 60 Hz

#### 4.1.4. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 12,5%

A continuación se muestran las gráficas PSD obtenidas para el eje con el nivel de defecto 3, según la Tabla 5, a cada frecuencia de rotación ensayada (ver Figuras 39, 40 y 41).

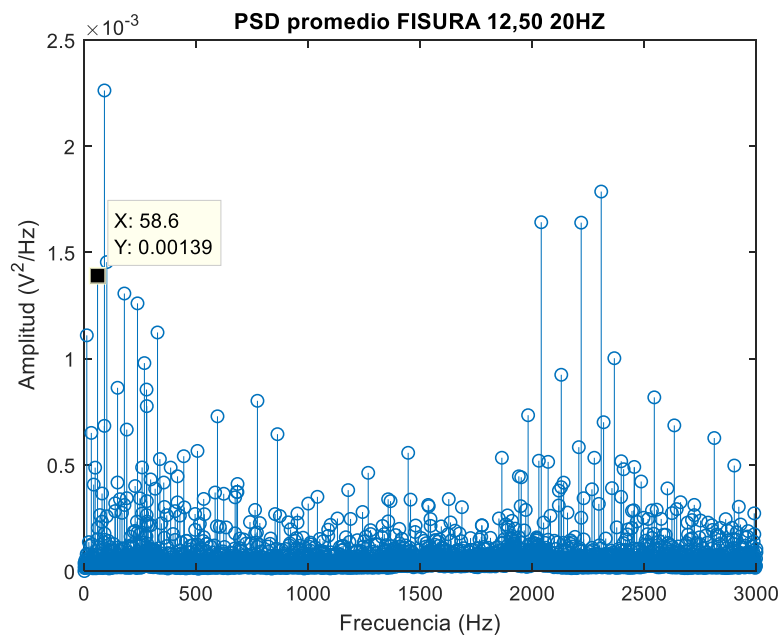


Figura 39. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 12,50% a 20 Hz

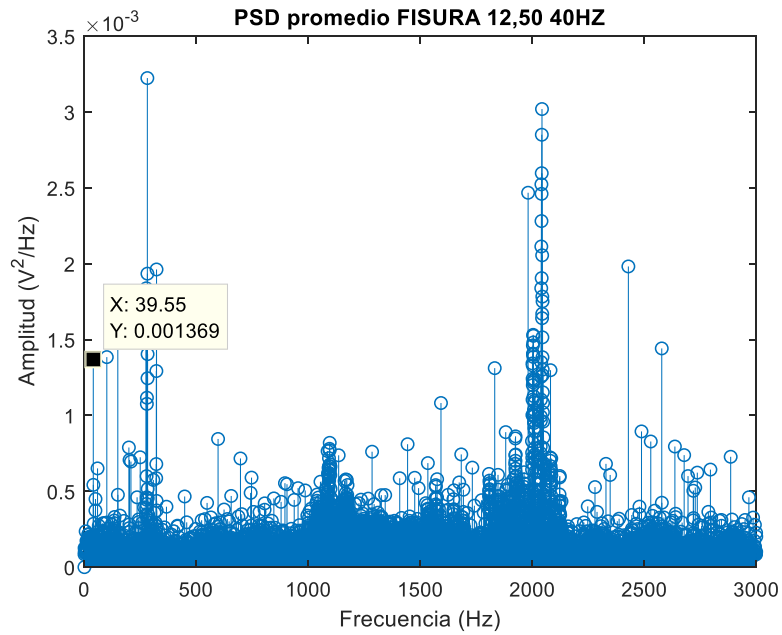


Figura 40. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 12,50% a 40 Hz

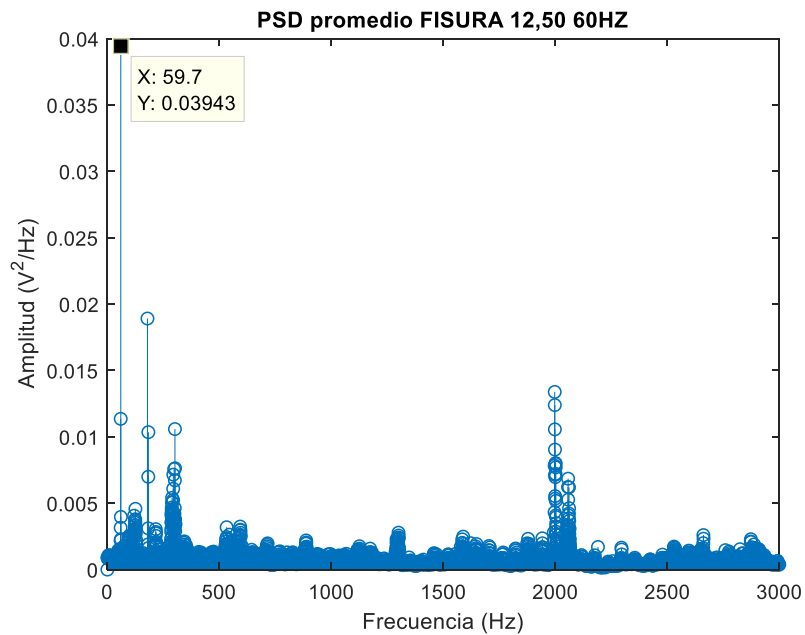


Figura 41. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 12,50% a 60 Hz

#### 4.1.5. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 16,65%

A continuación se muestran las gráficas PSD obtenidas para el eje con el nivel de defecto 4, según la Tabla 5, a cada frecuencia de rotación ensayada (ver Figuras 42, 43 y 44).

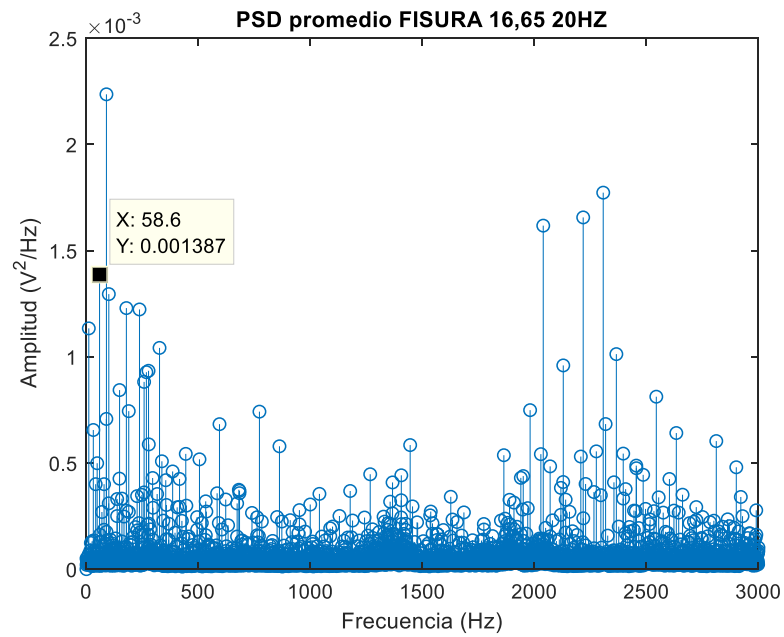


Figura 42. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 16,65% a 20 Hz

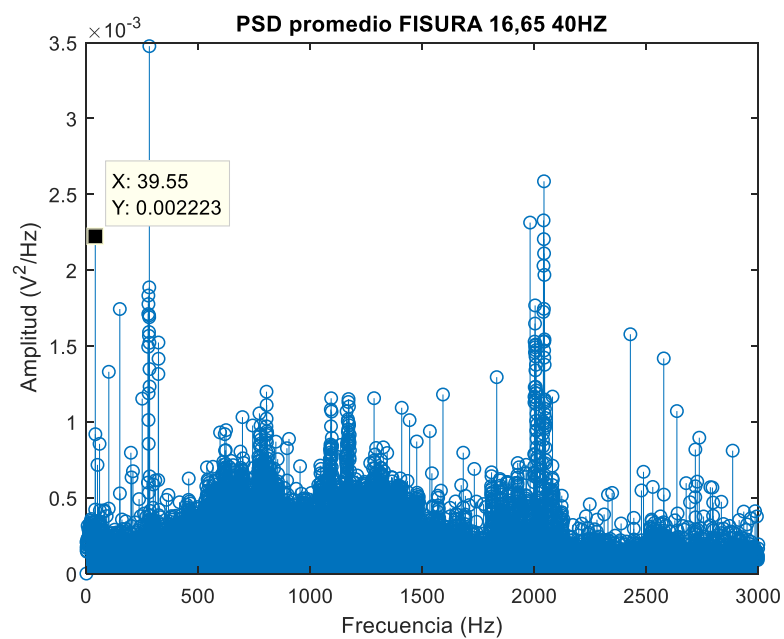


Figura 43. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 16,65% a 40 Hz

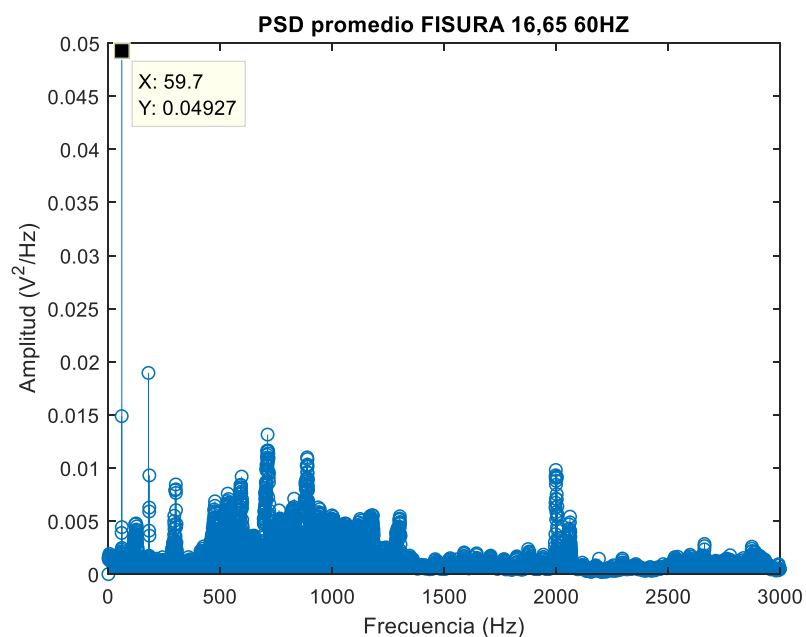


Figura 44. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 16,65% a 60 Hz

#### 4.1.6. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 22,15%

A continuación se muestran las gráficas PSD obtenidas para el eje con el nivel de defecto 5, según la Tabla 5, a cada frecuencia de rotación ensayada (ver Figuras 45, 46 y 47).

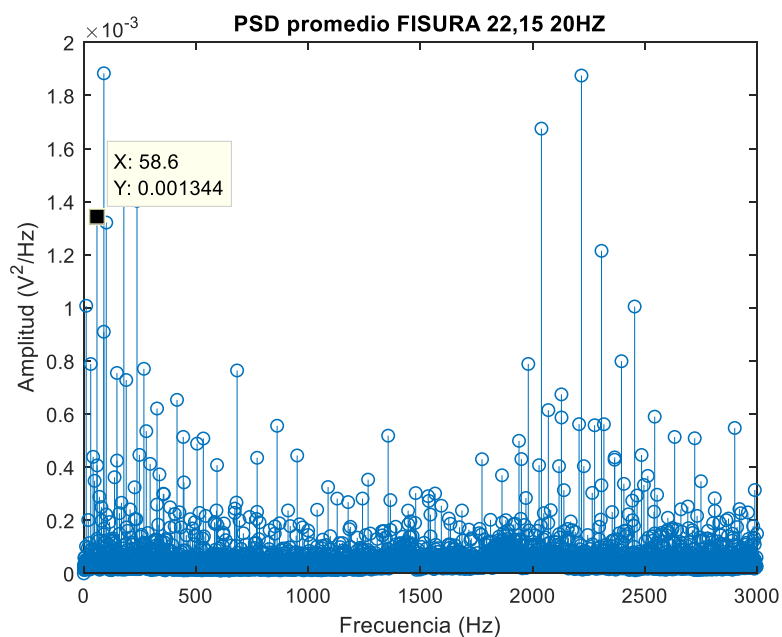


Figura 45. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 22,15% a 20 Hz

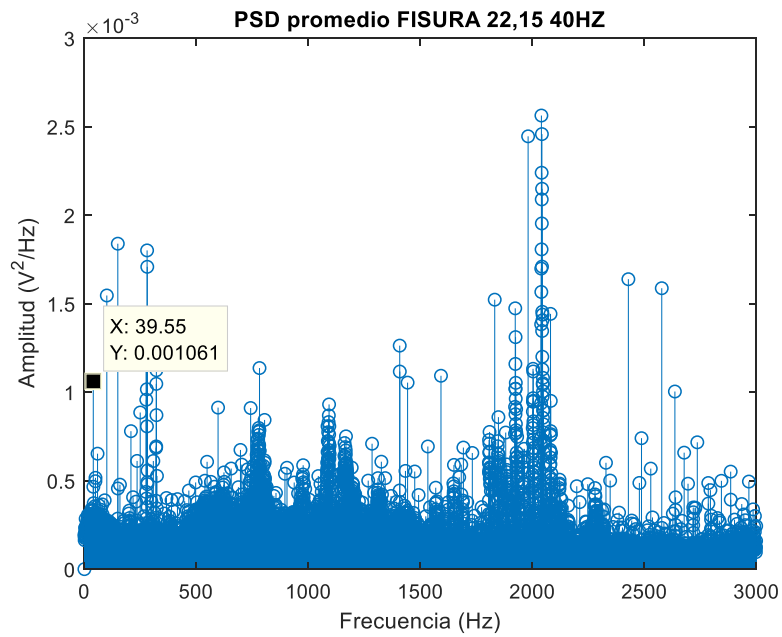


Figura 46. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 22,15% a 40 Hz

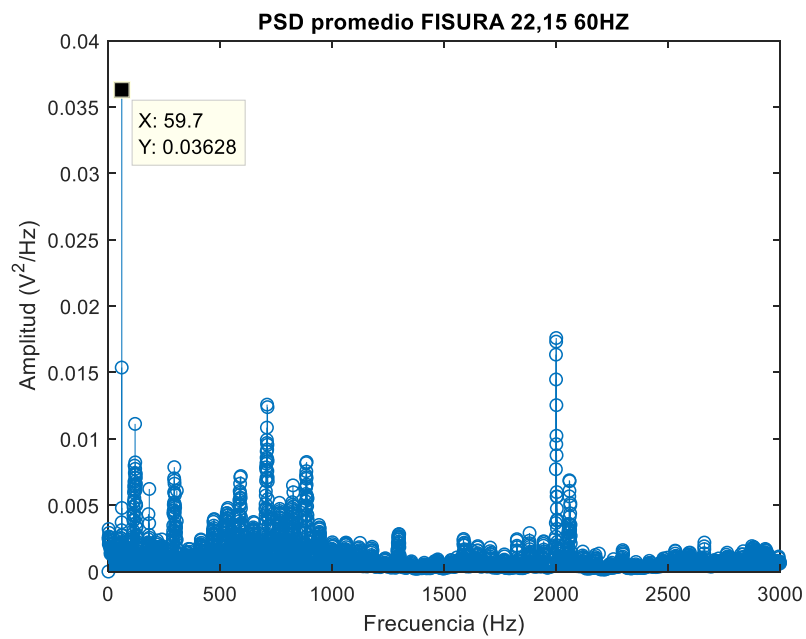


Figura 47. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 22,15% a 60 Hz

#### 4.1.7. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 25%

A continuación se muestran las gráficas PSD obtenidas para el eje con el nivel de defecto 6, según la Tabla 5, a cada frecuencia de rotación ensayada (ver Figuras 48, 49 y 50).

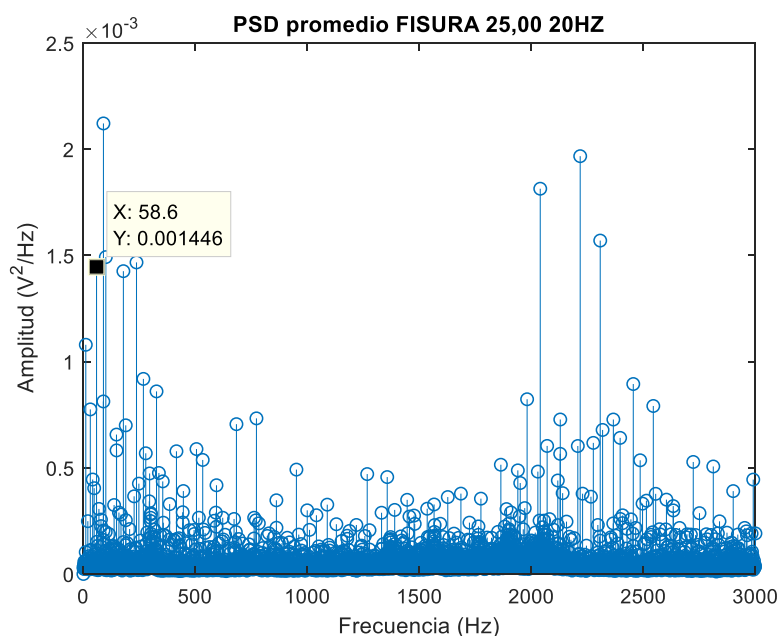


Figura 48. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 25,00% a 20 Hz

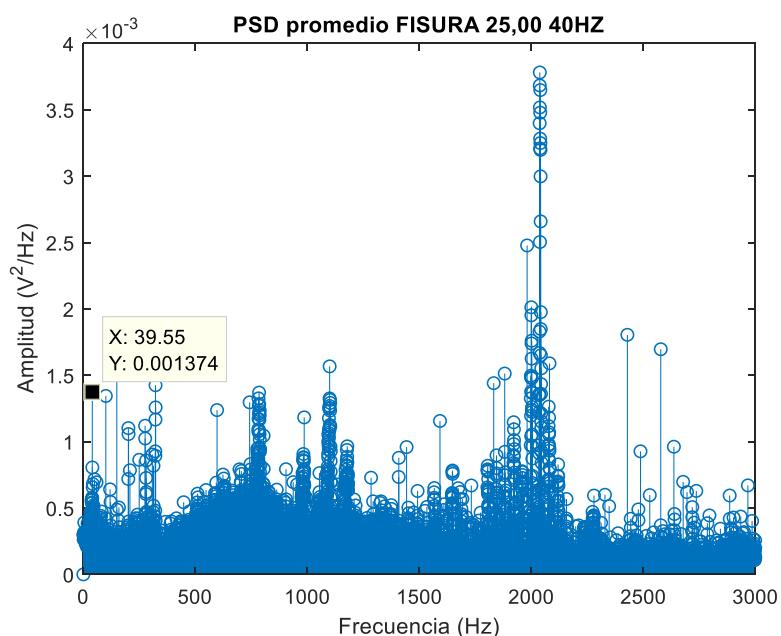


Figura 49. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 25,00% a 40 Hz

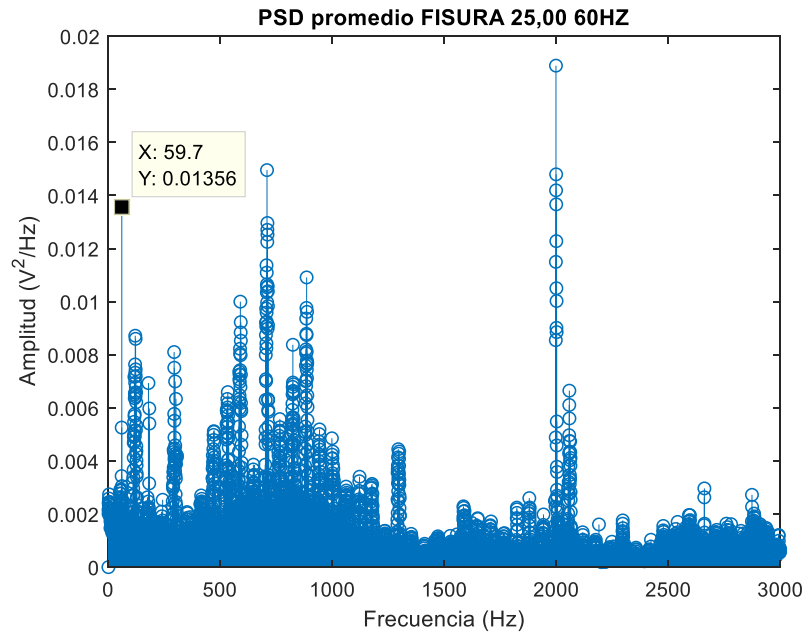


Figura 50. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 25,00% a 60 Hz

#### 4.1.8. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 33,25%

A continuación se muestran las gráficas PSD obtenidas para el eje con el nivel de defecto 7, según la Tabla 5, a cada frecuencia de rotación ensayada (ver Figuras 51, 52 y 53).

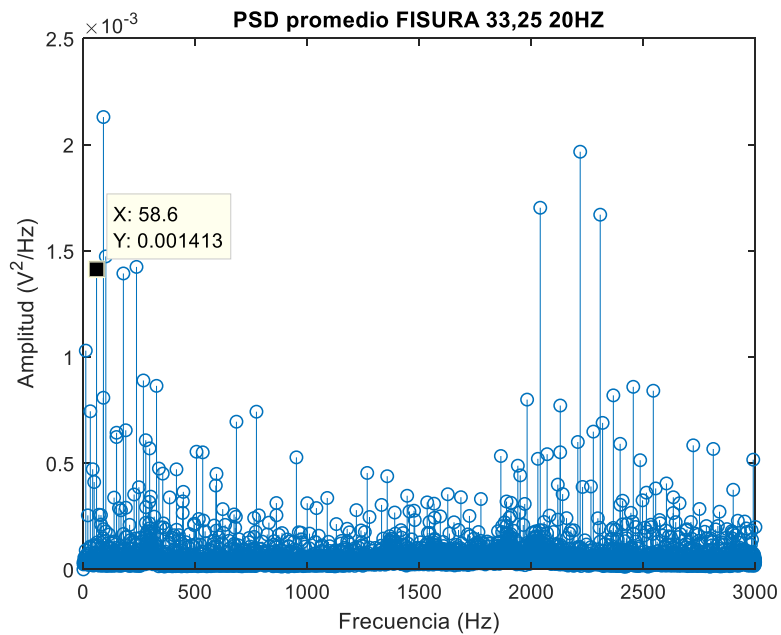


Figura 51. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 33,25% a 20 Hz



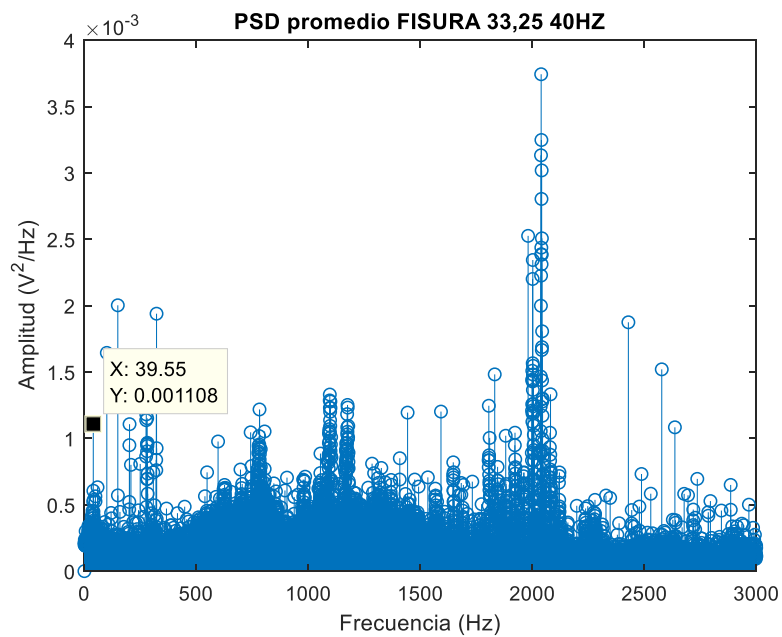


Figura 52. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 33,25% a 40 Hz

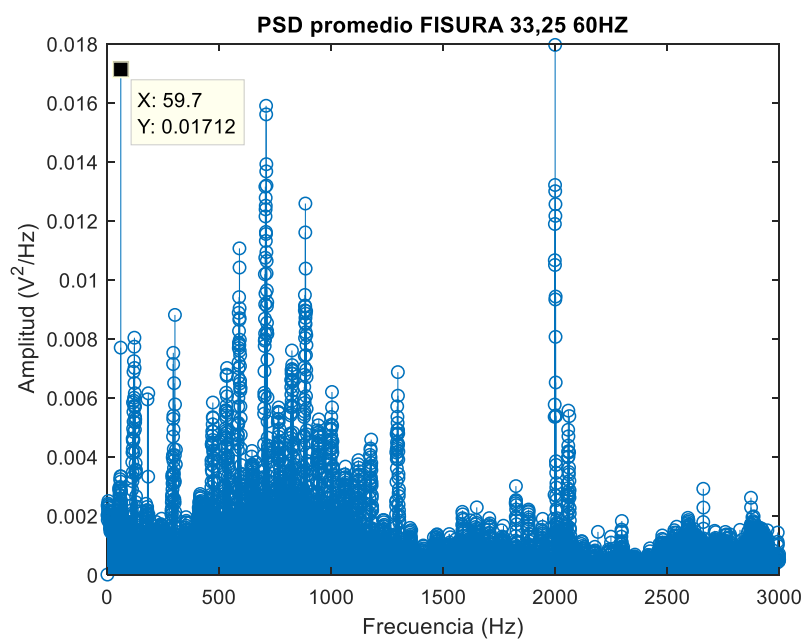


Figura 53. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 33,25% a 60 Hz

#### 4.1.9. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 41,65%

A continuación se muestran las gráficas PSD obtenidas para el eje con el nivel de defecto 8, según la Tabla 5, a cada frecuencia de rotación ensayada (ver Figuras 54, 55 y 56).

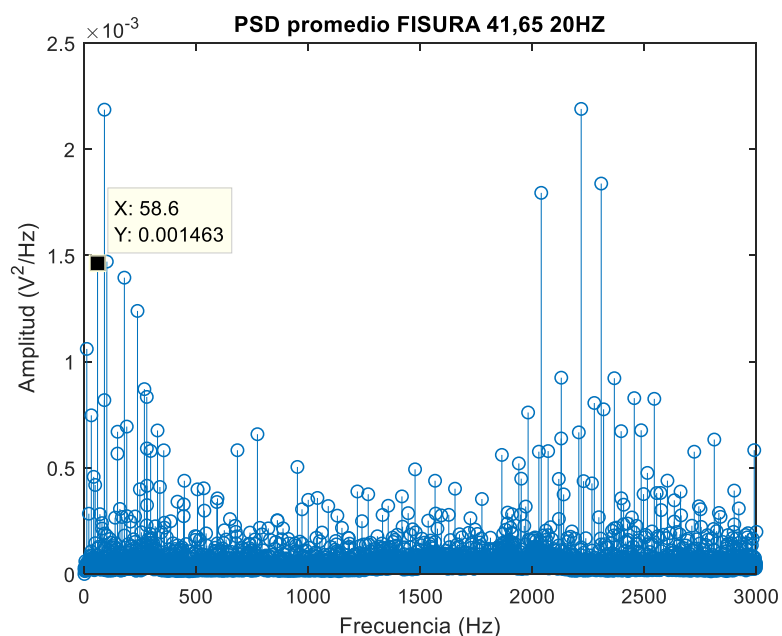


Figura 54. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 41,65% a 20 Hz

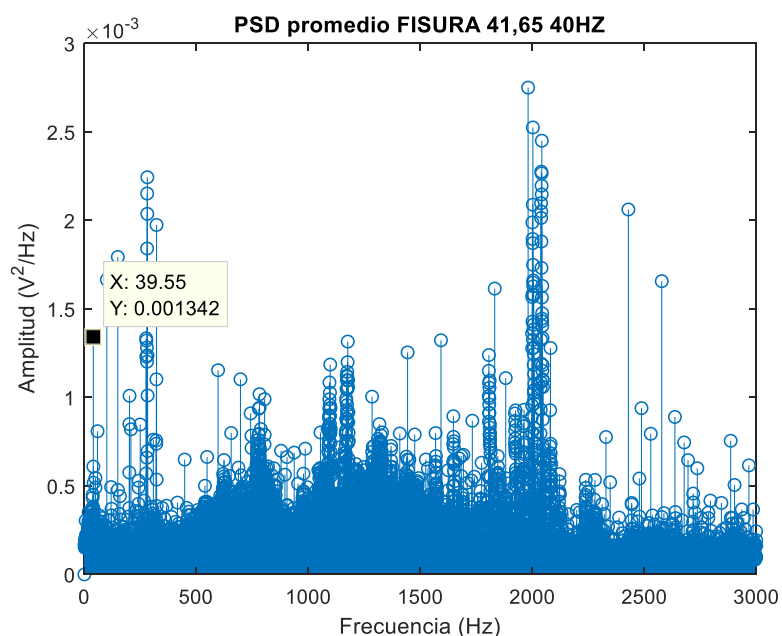


Figura 55. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 41,65% a 40 Hz

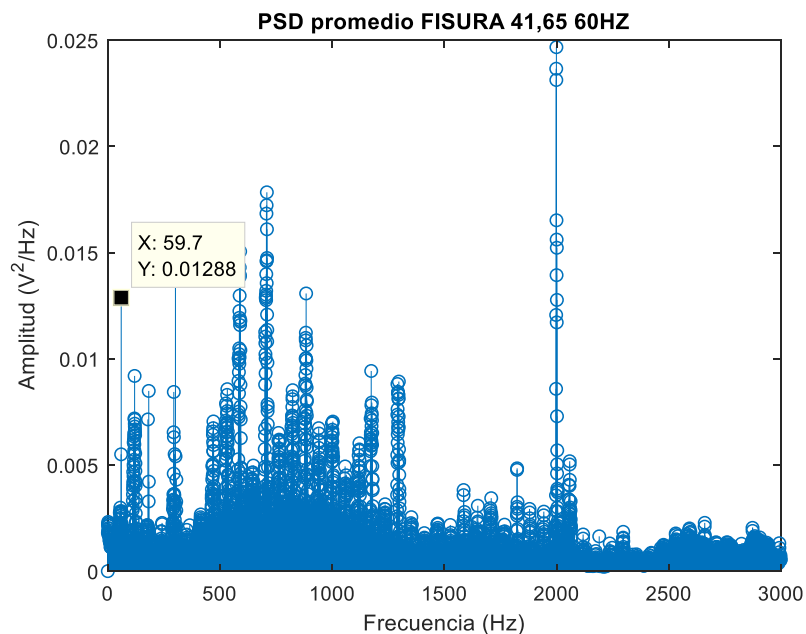


Figura 56. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 41,65% a 60 Hz

#### 4.1.10. PSD SOBRE EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 50%

A continuación se muestran las gráficas PSD obtenidas para el eje con el nivel de defecto 9, según la Tabla 5, a cada frecuencia de rotación ensayada (ver Figuras 57, 58 y 59).

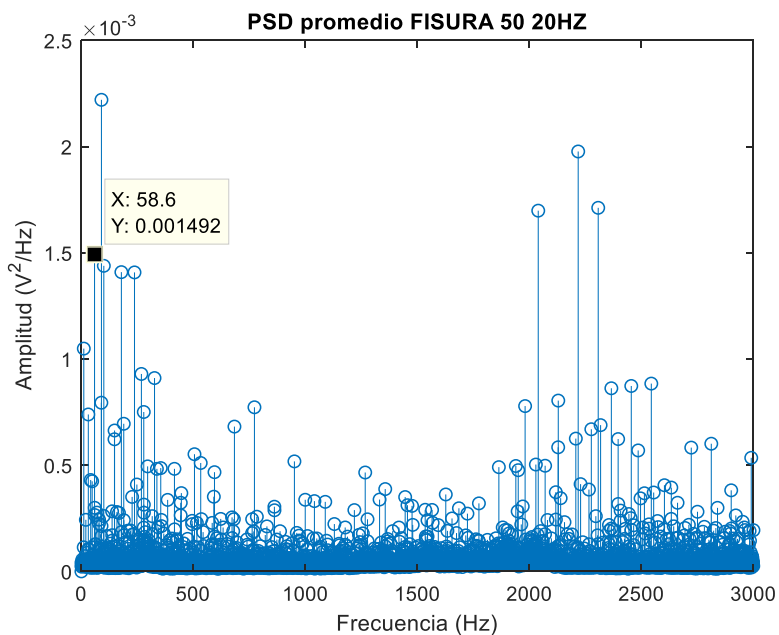


Figura 57. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 50,00% a 20 Hz

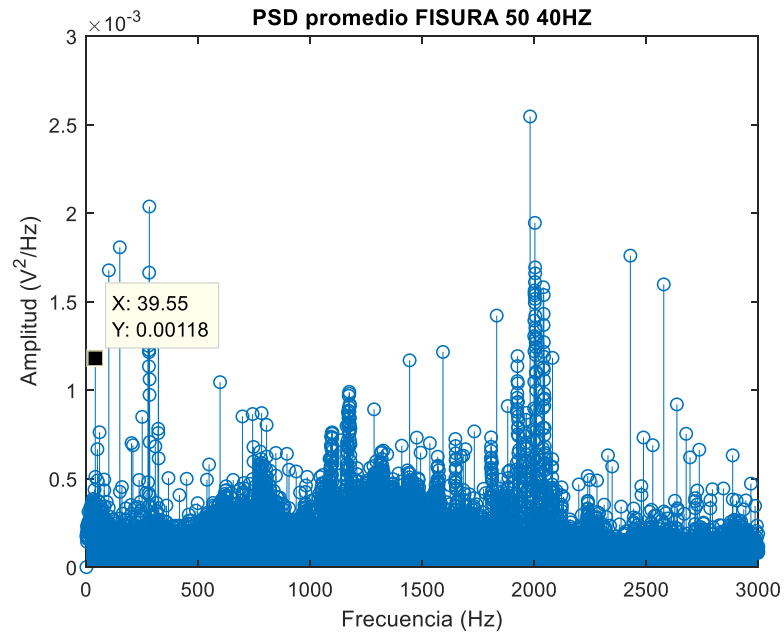


Figura 58. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 50,00% a 40 Hz

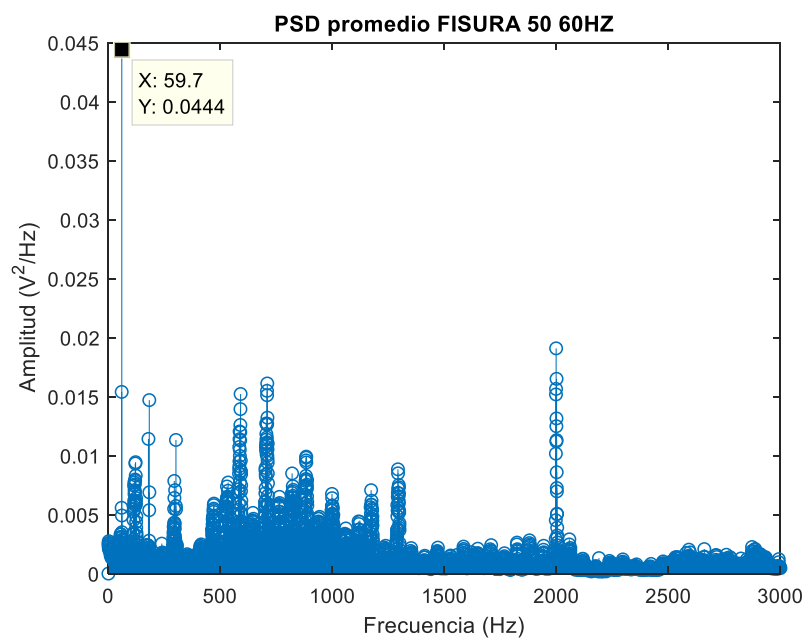


Figura 59. Espectro de frecuencias obtenido a través de la PSD del eje con profundidad de defecto del 50,00% a 60 Hz

#### 4.1.11. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PSD

Una vez vistas las gráficas PSD, se muestra una serie de tablas en las que se comparan los tres primeros armónicos de la frecuencia de rotación del eje, ya que según se ha visto en el apartado 2.3 (Fisura lateral en ejes) son los posibles indicativos de la presencia de una fisura lateral. Estos armónicos se comparan

Finalmente, teniendo en cuenta estos estudios, los datos más importantes obtenidos de las imágenes mostradas en los apartados anteriores se recogen en las siguientes tablas:

EJE SANO						
W (Hz)	20 Hz		40 Hz		60 Hz	
Armónicos	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)
1X	19,78	0,000245	39,55	0,00226	59,7	0,04479
2X	41,38	0,0004104	79,84	0,0004207	119	0,003908
3X	58,6	0,001491	121,6	0,0004912	178,7	0,01587

Tabla 5. Datos de los tres primeros armónicos de eje sano en las tres frecuencias de giro

EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 4,15%						
W (Hz)	20 Hz		40 Hz		60 Hz	
Armónicos	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)
1X	19,78	0,0001419	39,55	0,002264	59,7	0,0465
2X	41,38	0,000391	79,84	0,0004129	121,6	0,003823
3X	58,6	0,001444	121,2	0,000232	178,7	0,02261

Tabla 6. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 4,15% en las tres frecuencias de giro

EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 8,3%						
W (Hz)	20 Hz		40 Hz		60 Hz	
Armónicos	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)
1X	19,78	0,000154	39,55	0,002089	59,7	0,04559
2X	41,38	0,0003944	79,84	0,00046	119,4	0,004102
3X	58,6	0,001405	121,2	0,000233	178,7	0,0189

Tabla 7. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 8,30% en las tres frecuencias de giro

EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 12,15%						
W (Hz)	20 Hz		40 Hz		60 Hz	
Armónicos	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)
1X	19,78	0,0001362	39,55	0,001369	59,7	0,03943
2X	41,38	0,0004071	81,3	0,0002888	119	0,004058
3X	58,6	0,00139	121,2	0,0002813	178,7	0,01891

Tabla 8. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 12,15% en las tres frecuencias de giro

EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 16,65%						
W (Hz)	20 Hz		40 Hz		60 Hz	
Armónicos	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)
1X	19,78	0,0001235	39,55	0,002223	59,7	0,04927
2X	41,38	0,0004001	79,47	0,0004174	123,4	0,004775
3X	58,6	0,001387	119	0,0002411	178,7	0,01895

Tabla 9. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 16,65% en las tres frecuencias de giro

EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 22,15%						
W (Hz)	20 Hz		40 Hz		60 Hz	
Armónicos	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)
1X	19,78	0,0002009	39,55	0,001061	59,7	0,03628
2X	41,38	0,0004391	79,84	0,0003658	119	0,01113
3X	58,6	0,001344	119	0,0002588	182,4	0,006223

Tabla 10. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 22,15% en las tres frecuencias de giro

EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 25%						
W (Hz)	20 Hz		40 Hz		60 Hz	
Armónicos	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)
1X	19,78	0,0002486	39,55	0,001374	59,7	0,01356
2X	41,38	0,0004447	81,3	0,0004734	119,8	0,008716
3X	58,6	0,001446	119	0,0006404	178,7	0,006934

Tabla 11. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 25,00% en las tres frecuencias de giro

EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 33,25%						
W (Hz)	20 Hz		40 Hz		60 Hz	
Armónicos	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)
1X	19,78	0,0002544	39,55	0,001108	59,7	0,01712
2X	41,38	0,0004714	81,3	0,000334	120,5	0,008029
3X	58,6	0,001413	119	0,0004384	182,4	0,006145

Tabla 12. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 33,25% en las tres frecuencias de giro

EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 41,65%						
W (Hz)	20 Hz		40 Hz		60 Hz	
Armónicos	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)
1X	19,78	0,0002838	39,55	0,001342	59,7	0,01288
2X	41,38	0,0004572	81,3	0,0003185	119,4	0,009191
3X	58,6	0,001463	119	0,0004933	182,4	0,008485

Tabla 13. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 41,65% en las tres frecuencias de giro

EJE CON FISURA DE PROFUNDIDAD 50%						
W (Hz)	20 Hz		40 Hz		60 Hz	
Armónicos	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)	Frecuencia (Hz)	Amplitud (V <sup>2</sup> /Hz)
1X	19,78	0,0002429	39,55	0,00118	59,7	0,0444
2X	41,38	0,0004303	79,47	0,0004948	121,2	0,009437
3X	58	0,001492	120,9	0,0002679	182,4	0,0417

Tabla 14. Datos de los tres primeros armónicos de eje con profundidad de defecto del 50,00% en las tres frecuencias de giro

Para poder comparar las amplitudes de cada señal  $\Delta Amplitud$  (%), se han introducido los datos en la expresión (Ec.30), recogiendo los resultados en las Tablas 16, 17 y 18, tal y como se muestra a continuación:

$$\Delta Amplitud (\%) = \frac{Amplitud\ señal\ del\ eje\ con\ defecto - Amplitud\ señal\ eje\ sano}{Amplitud\ señal\ eje\ sano} \cdot 100 \quad (Ec. 30)$$



20 Hz	ARMÓNICOS		
	1x	2x	3x
<b>ΔAmplitud 4,15%</b>	-42,08	-4,72	-3,15
<b>ΔAmplitud 8,3%</b>	-37,14	-3,89	-5,76
<b>ΔAmplitud 12,25%</b>	-44,40	-0,80	-6,77
<b>ΔAmplitud 16,65%</b>	-49,59	-2,50	-6,97
<b>ΔAmplitud 22,15%</b>	-18	6,99	-9,85
<b>ΔAmplitud 25%</b>	1,46	8,35	-3,01
<b>ΔAmplitud 33,25%</b>	3,83	14,86	-5,23
<b>ΔAmplitud 41,65%</b>	15,83	11,40	-1,87
<b>ΔAmplitud 50%</b>	-0,85	4,84	0,06

Tabla 15. Comparación de las amplitudes de los distintos niveles de defecto con las amplitudes de eje sano a 20 Hz

En la Tabla 16 se puede observar que el segundo armónico de la frecuencia de rotación del eje aumenta para el caso del eje con defecto lateral a partir del nivel de defecto del 22,15%.

40 Hz	ARMÓNICOS		
	1x	2x	3x
<b>ΔAmplitud 4,15%</b>	0,18	-1,85	-52,77
<b>ΔAmplitud 8,3%</b>	-7,57	9,34	-52,57
<b>ΔAmplitud 12,25%</b>	-39,42	-31,35	-42,73
<b>ΔAmplitud 16,65%</b>	-1,64	-0,78	-50,92
<b>ΔAmplitud 22,15%</b>	-53,05	-13,05	-47,31
<b>ΔAmplitud 25%</b>	-39,20	12,53	30,37
<b>ΔAmplitud 33,25%</b>	-50,97	-20,61	-10,75
<b>ΔAmplitud 41,65%</b>	-40,62	-24,29	0,43
<b>ΔAmplitud 50%</b>	-47,79	17,61	-45,46

Tabla 16. Comparación de las amplitudes de los distintos niveles de defecto con las amplitudes de eje sano a 40 Hz

En la Tabla 17 se puede observar que los tres primeros armónicos no ofrecen resultados concluyentes para la detección de fisuras laterales, ya que en casi todos los casos, la amplitud de la señal es mayor en el caso de eje sano que en el caso de eje con defecto lateral.

60 Hz	ARMÓNICOS		
	1x	2x	3x
<b>ΔAmplitud 4,15%</b>	3,82	-2,18	42,47
<b>ΔAmplitud 8,3%</b>	1,79	4,96	19,09
<b>ΔAmplitud 12,25%</b>	-11,97	3,84	19,16
<b>ΔAmplitud 16,65%</b>	10,00	22,19	19,41
<b>ΔAmplitud 22,15%</b>	-19,00	184,80	-60,79
<b>ΔAmplitud 25%</b>	-69,73	123,03	-56,31
<b>ΔAmplitud 33,25%</b>	-61,78	105,45	-61,28
<b>ΔAmplitud 41,65%</b>	-71,24	135,18	-46,53
<b>ΔAmplitud 50%</b>	-0,87	141,48	162,76

Tabla 17. Comparación de las amplitudes de los distintos niveles de defecto con las amplitudes de eje sano a 60 Hz

En la Tabla 18 se puede observar que el segundo armónico puede indicar la presencia del defecto lateral a partir del defecto al 8,3 %, ya que la amplitud de la señal es mayor en el caso del eje defectuoso (incrementos positivos de amplitud).

Por lo tanto, observando las tablas en las que se calculan los incrementos de amplitud se puede observar que en los ensayos realizados a 20 Hz y 40 Hz no se obtiene ninguna conclusión relevante, ya que los resultados muestran en la mayoría de los casos incrementos negativos. Esto puede deberse a que el ruido de la propia señal enmascaren los picos producidos en los armónicos, o a la presencia de holgura entre los rodamientos y el eje, debida a errores durante la etapa de fabricación del eje mediante un torno, por lo que las lecturas a estas frecuencias de rotación no son determinantes a la hora de detectar el defecto en cuestión.

Sin embargo, en la Tabla 18 se puede observar claramente como el incremento de la amplitud de los defectos con respecto al eje sano en el segundo armónico es positivo y elevado. Esto puede indicar la presencia de la fisura realizada durante el ensayo, lo cual concuerda con los estudios detallados en el apartado 2.3 (Fisura lateral en ejes).

En resumen, tras realizar el análisis de los datos obtenidos a través de la PSD, se observa que la frecuencia de rotación del eje de 60 Hz es la más óptima para identificar la presencia de una fisura sobre un eje, y en concreto, el segundo armónico de esa frecuencia de rotación.

#### 4.2. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE WTP

En este apartado se incluyen los resultados obtenidos tras aplicar la transformada de Wavelet en paquetes a las señales de vibración obtenidas durante el ensayo, utilizando una Wavelet madre daubechies 6 y un nivel de descomposición de 3 se obtienen 8 paquetes, como se ha detallado en el apartado 2.2.3.1. (Ver Figuras 60, 61 y 62).

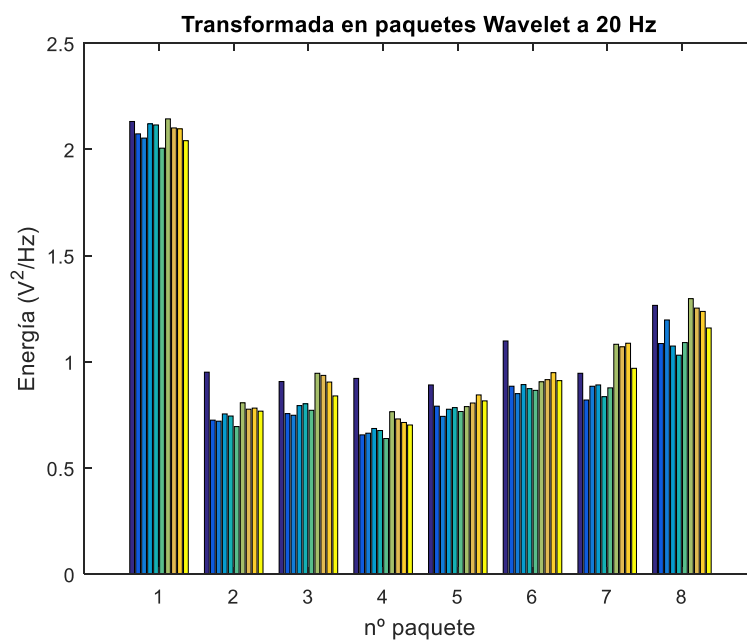


Figura 60. Representación de la energía mediante los paquetes de Wavelet a 20 Hz

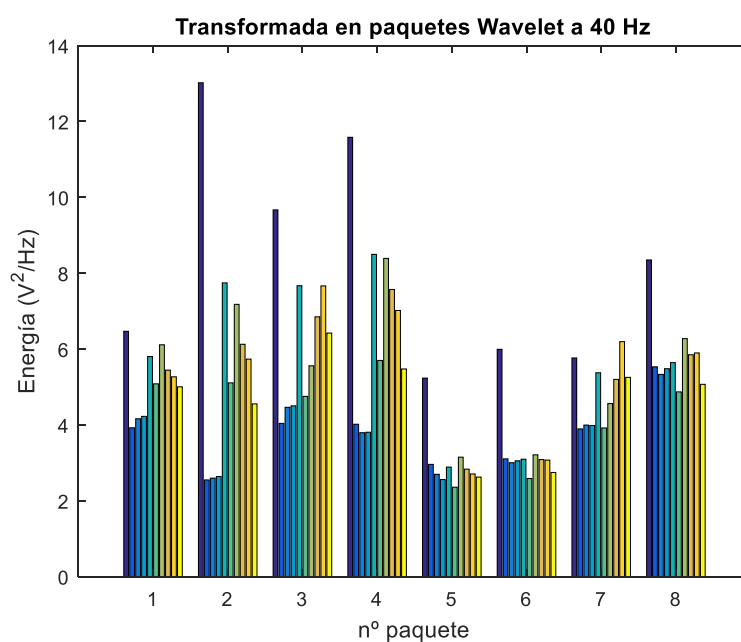


Figura 61. Representación de la energía mediante los paquetes de Wavelet a 40 Hz

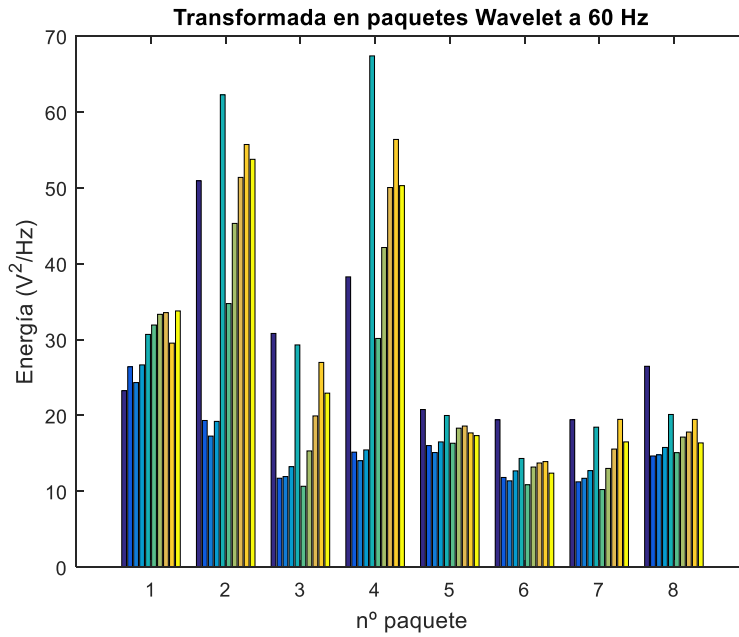


Figura 62. Representación de la energía mediante los paquetes de Wavelet a 60 Hz.

Dado que interpretar las gráficas de energía de cada defecto por cada paquete es difícil a priori, se han elaborado una serie de gráficas donde es posible comparar de una manera más sencilla las variaciones de energía de cada defecto en cada paquete y para cada frecuencia de rotación ensayada. Estas graficas se muestran a continuación (ver Figuras 63, 64 y 65).

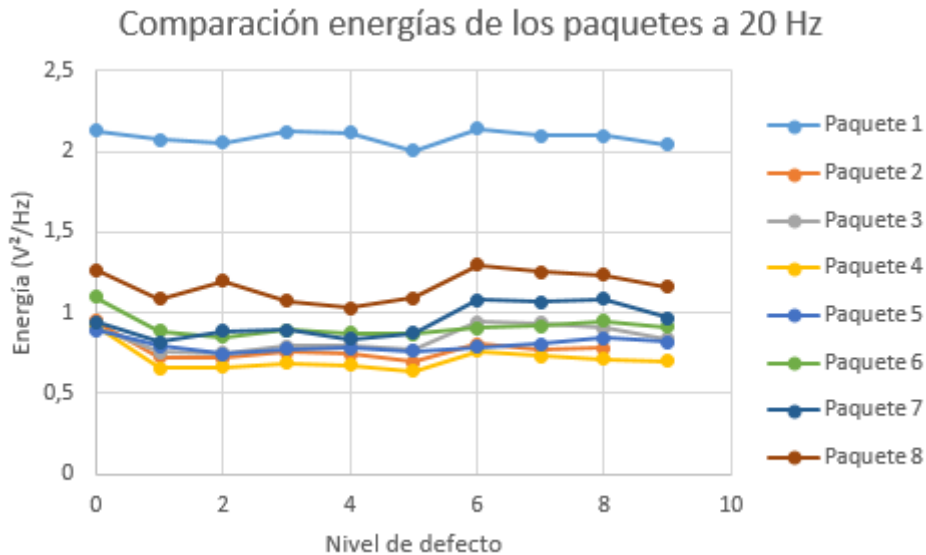


Figura 63. Comparación de energías entre los paquetes Wavelet a 20 Hz

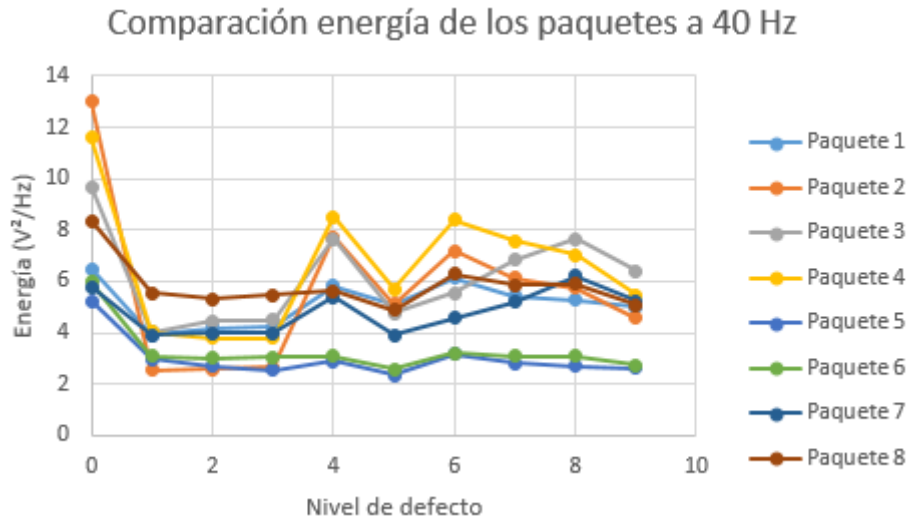


Figura 64. Comparación de energías entre los paquetes Wavelet a 40 Hz

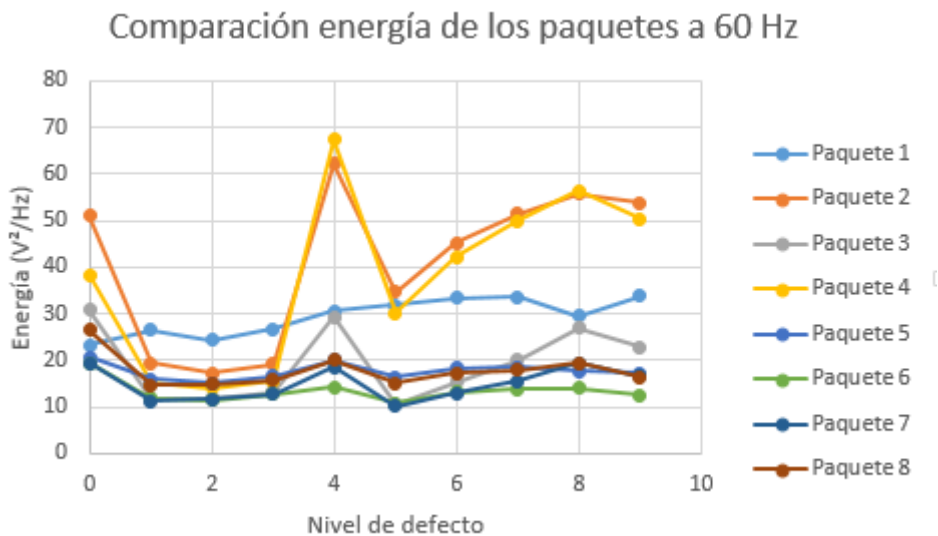


Figura 65. Comparación de energías entre los paquetes Wavelet a 60 Hz

Observando la Figura 63, a 20 Hz, se ve que la variación de la energía por paquete en función del nivel de defecto es mínima, por lo que no se puede sacar ningún tipo de conclusión determinante.

En la Figura 64, se observan pequeñas variaciones en la energía de algunos paquetes, sobre todo de los paquetes nº 2 y 4 a partir del 4º nivel de defecto. Por tanto, a la hora de investigar algún hecho que revele la presencia de la fisura en el eje, hay que fijarse en las variaciones de energía de estos paquetes.

En la Figura 65, se observa de una manera más clara como las variaciones de energía en estos paquetes (2 y 4) se hacen más notorias conforme se avanza a través de los niveles de defecto. Por tanto, tras analizar estos resultados, se observa que analizar la variación de energía en los paquetes 2 y 4 puede ayudar a la hora proceder con la detección de fisuras, mientras que los paquetes 5, 6, 7 y 8 se descartarían por presentar muy poca variación de energía.

## 5. PRESUPUESTO

A continuación la Tabla 19 muestra el presupuesto detallado de la realización de este trabajo. Al no tratarse de un proyecto industrial, sino una línea de investigación del grupo MAQLAB del departamento de Ingeniería Mecánica, basta con calcular la amortización de los equipos utilizados, ya que todo el material usado es propiedad de este grupo.

Amortización material experimental	Coste total (€)	% uso dedicado al proyecto	Dedicación (meses)	Período de depreciación	Coste imputable (€) <sup>1</sup>
Banco de ensayos Rotokit <sup>2</sup>	13339,42	100	1	60	222,32
Acelerómetro Brüel&Kjaer 4383	400	100	1	60	6,66
Tarjeta de adquisición de datos Keithley KUSB-3100	260,63	100	1	60	4,34
Acondicionador Nexus 2693	10000	100	1	60	166,66
Cables y conectores	60	100	1	60	1
Otros materiales y herramientas					
Sierra de arco	25,46	75	1	60	0,32
Redondo de aluminio	10	100	1	1	10
Soportes para fisurar el eje	15	100	1	60	0,25
Equipo informático y licencias					
Ordenador personal	379	50	5	60	15,79
Matlab <sup>®3</sup>	0	100	3	60	0
Microsoft office <sup>®3</sup>	0	75	2	60	0
Personal	categoría		Dedicación (Hombre/mes)	Coste (€/mes)	
	Ingenieros		2	2694,39	5268,78
	Técnicos		0,05	1800	90
Subcontratación de tareas					0.00
Costes de funcionamiento					0.00
Costes indirectos (20%)					1157,224
Presupuesto total					6943,34 €

Tabla 18. Presupuesto de los costes que conllevan este estudio

- El presupuesto final, incluyendo los materiales, máquinas, personal y equipos utilizados es de 6943,34 €.
- El redondo de aluminio se compró exclusivamente para la realización de los ensayos, quedando inutilizable para futuros trabajos.
- Se considera que un hombre-mes son 131,25 horas, y el coste de un ingeniero en (€/mes) es de 2694.39 €, mientras que el de un técnico es de 1800 €/mes.
- Se considera que La vida útil del material experimental es de 5 años (60 meses).
- <sup>1</sup>Para calcular el coste imputable (amortización) se utiliza la siguiente expresión (Ec.31):

$$\frac{A}{B} \times C \times D \quad (Ec. 31)$$

Donde:

- A es el número de meses que se utiliza el equipo para el Proyecto
  - B es el período de depreciación, se considera de 5 años (60 meses) para todo el equipo, excepto el redondo de aluminio que se utiliza únicamente para el proyecto y después se desecha.
  - C es el coste del equipo
  - D es el porcentaje de uso que se dedica al Proyecto, expresado en forma decimal.
- 
- <sup>2</sup>el precio del banco de ensayos incluye todos los componentes necesarios para la realización de las pruebas (acoplamiento, rodamientos, herramientas, etc.)
  - <sup>3</sup>Las licencias de Matlab® y Microsoft Office® son gratuitas para personal y alumnos de la Universidad.



## 6. CONCLUSIONES

Como conclusiones, inicialmente, se ha recogido toda la información y herramientas necesarias para aprender el funcionamiento de la máquina de simulación de fallos, con el fin de realizar los ensayos necesarios de la manera más óptima.

Se han tomado las medidas de vibración de un eje, colocado sobre una máquina de simulación de fallos. Dichas medidas se han tomado tanto para el eje sano en su estado inicial, como para el eje con una fisura lateral, cuya profundidad se ha ido variando progresivamente (ver Tabla 5).

Se ha realizado un procesamiento de esas señales vibratorias, haciendo un análisis en el dominio de la frecuencia, empleando técnicas como la transformada rápida de Fourier (FFT) o la densidad de potencia espectral (PSD). También se ha realizado un análisis en el dominio del tiempo-frecuencia, empleando la transformada en paquetes Wavelet.

Con los resultados obtenidos se ha podido comprobar qué frecuencias de giro son más apropiadas para la detección del defecto en el eje, que para este caso se corresponde con la frecuencia de rotación de 60 Hz, que es la mayor a la que se ha realizado los ensayos, mientras que para las frecuencias de 20 Hz y 40 Hz no se han podido obtener resultados concluyentes para ninguno de los métodos analizados, debido posiblemente a una holgura y un desalineamiento entre el eje y los rodamientos. Esto puede ser debido a un fallo de fabricación del eje.

En cuanto a los resultados obtenidos a 60 Hz, aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT) y la densidad de potencia espectral (PSD) se ha observado que el segundo armónico, correspondiente a una frecuencia de 120 Hz aproximadamente, es el que podría indicar la presencia de defectos, siendo apenas perceptible para los niveles de defecto más pequeños.

Lo mismo sucede al realizar un análisis en el dominio del tiempo-frecuencia mediante la transformada en paquetes Wavelet. Al observar la energía de los paquetes a las frecuencias de rotación de 20 Hz y 40 Hz se puede deducir que apenas hay variación, por lo que estos resultados no aportan información para futuros sistemas de detección. Mientras que a 60 Hz se ha podido concluir que los paquetes 2 y 4 son los que mayor variación de energía sufren conforme crece la fisura, por lo que estos paquetes se podrían considerar en un futuro para la detección de estos defectos.

Por otro lado, se ha observado que las medidas del nivel de defecto 4, correspondiente a una profundidad de 16,65 %, sufren un incremento de energía que destaca por encima de las demás, esto se puede considerar como un dato atípico, ya que puede deberse a un fallo en la medición de este ensayo.

## 6.1 FUTUROS TRABAJOS

Este trabajo es un estudio previo que sirve como referencia para futuros trabajos, los cuales pueden ser:

- Realizar los ensayos a otras frecuencias de rotación mayores, ya que se ha observado que a mayor velocidad se obtienen resultados más claros.
- Realizar los ensayos con un montaje y una fabricación del eje asegurándose que no haya holgura para que las medidas que se obtengan sean más fiables.
- Probar con otras técnicas de procesamiento de señales más avanzadas.
- Crear un algoritmo que sea capaz de detectar la presencia de fisuras laterales en ejes, introduciendo los parámetros que se han observado que puedan revelar la presencia del defecto en el eje

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Página web de energiza, mantenimiento predictivo  
<http://www.energiza.org/mantenimiento-de-plantas/19-mantenimiento-de-plantas/13-mantenimiento-predictivo>  
Último acceso: septiembre 2018
- [2] Página web de preditec, mantenimiento predictivo  
<http://www.preditec.com/mantenimiento-predictivo/>  
Último acceso: septiembre 2018
- [3] Página web negocios en Navarra, tendencias futuras del mantenimiento  
[https://www.negociosennavarra.com/hacia-mantenimiento-del-futuro-ambito-la-fabrica-inteligente/?doing\\_wp\\_cron=1537761312.1271800994873046875000](https://www.negociosennavarra.com/hacia-mantenimiento-del-futuro-ambito-la-fabrica-inteligente/?doing_wp_cron=1537761312.1271800994873046875000)  
Último acceso: septiembre 2018
- [4] Página web de repuestoscoches24, repuestos de automóvil  
<https://www.repuestoscoches24.es/recambios/palier/vw>  
Último acceso: septiembre 2018
- [5] Página web de Kisspng, bogie vagón de mercancías  
<https://es.kisspng.com/png-rail-transport-bogie-railroad-car-goods-wagon-rail-1627177/>  
Último acceso: septiembre 2018
- [6] Página web de la Junta de Andalucía, departamento de electromecánica  
[http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/04700107/helvia/sitio/print.cgi?wid\\_seccion=4&wid\\_item=26&wOut=print](http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/04700107/helvia/sitio/print.cgi?wid_seccion=4&wid_item=26&wOut=print)  
Último acceso: septiembre 2018
- [7] Página web de El Mundo, noticias del mundo, Infierno en Viareggio  
<http://www.elmundo.es/elmundo/2009/06/30/internacional/1246376848.html>  
Último acceso: septiembre 2018
- [8] Boletín Oficial del Estado (BOE). Real Decreto 1367/2007  
<https://boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-18397-consolidado.pdf>  
Último acceso: septiembre 2018
- [9] Boletín Oficial del Estado (BOE). Real Decreto 1311/2005  
<https://www.boe.es/boe/dias/2005/11/05/pdfs/A36385-36390.pdf>  
Último acceso: septiembre 2018
- [10] Página web de Lean Manufacturing, mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo  
<https://leanmanufacturing10.com/mantenimiento-correctivo-preventivo-y-predictivo-definiciones-y-diferencias>  
Último acceso: septiembre 2018

- [11] Página web de Mantenimiento Petroquímica, mantenimiento predictivo  
<http://www.mantenimientopetroquimica.com/mantenimientopredictivo.html>  
Último acceso: septiembre 2018
- [12] Página web TUV NORD, ensayos no destructivos.  
<https://www.tuv-nord.com/es/es/inspeccion-industrial/ensayos-no-destructivos/>  
Último acceso: septiembre 2018
- [13] Página web de INDUCTECSA, tipos de ensayos no destructivos  
<http://www.indutecsa.com/index.php/noticias/10-los-tipos-de-ensayos-no-destructivos-mas-comunes>  
Último acceso: septiembre 2018
- [14] Página web de Erion, ensayos no destructivos aplicados a ejes.  
<http://erion.es/ensayos-no-destructivos/>  
Último acceso: septiembre 2018
- [15] Página web monografías, NDT ultrasonidos.  
<https://www.monografias.com/trabajos60/inspeccion-ultrasonido-materiales/inspeccion-ultrasonido-materiales.shtml>  
Último acceso: septiembre 2018
- [16] Página web de MIPSAs, NDT líquidos penetrantes.  
<https://www.mipsa.com.mx/dotnetnuke/Procesos/Soldadura-inspeccion-liquidos>  
Último acceso: septiembre 2018
- [17] Documento de la Fuerza Aérea, Servicio de mantenimiento.  
<http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/Curso%20de%20END%20y%20Mantenimiento%20Predictivo%20-%20Diciembre%202011/Ensayos%20superficiales/Liquidos%20penetrantes/LIQUIDOS%20PENETRANTES%201.pdf>  
Último acceso: septiembre 2018
- [18] Blog Mantenimiento Industrial  
<http://mantenimientoindustrialind201335.blogspot.com/>  
Último acceso: septiembre 2018
- [19] Página web de SKF, mantenimiento basado en la condición.  
<http://www.skf.com/pe/industry-solutions/railways/condition-monitoring/index.html>  
Último acceso: septiembre 2018
- [20] Página web de Cecma, documento sobre ventajas y desventajas del mantenimiento basado en la condición.  
[http://www.cecma.com.ar/\\_\\_mm/biblioteca/modulo-ii-el-deterioro-de-los-equipos-mantenimiento-correctivo-preventivo-y-predictivo-v1.pdf](http://www.cecma.com.ar/__mm/biblioteca/modulo-ii-el-deterioro-de-los-equipos-mantenimiento-correctivo-preventivo-y-predictivo-v1.pdf)  
Último acceso: septiembre 2018

- [21] Página web de Redalyc, documento de análisis de señales vibratorias.  
<http://www.redalyc.org/pdf/870/87011532002.pdf>  
Último acceso: septiembre 2018
- [22] M.J. Gómez García, “Metodología de selección de indicadores óptimos para el análisis y diagnóstico del estado de la máquina: aplicación a elementos mecánicos rotativos”, Tesis doctoral, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2014. [En línea].  
Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/19021?locale-attribute=en>
- [23] H. Nyquist. Certain topics in telegraph transmission theory. In Trans. AIEE, Reprint as classic paper in: Proc IEEE vol. 90, No.2, Febr. 2002, pages 617–644, April 1928.
- [24] Documento sobre el procesamiento digital de señales a través de la transformada de Fourier  
<http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-Martin%20Carrizo.pdf>  
Último acceso: septiembre 2018
- [25] Documento de la Universidad Politécnica de Madrid. La transformada de Fourier. Una visión pedagógica. Jesús Bobadilla, Pedro Gómez y Jesús Bernal.  
[http://stel.ub.edu/labfon/sites/default/files/EFE-X-JBobadilla\\_PGomez\\_JBernal-FFT\\_una\\_vision\\_pedagogica.pdf](http://stel.ub.edu/labfon/sites/default/files/EFE-X-JBobadilla_PGomez_JBernal-FFT_una_vision_pedagogica.pdf)  
Último acceso: septiembre 2018
- [26] Página web de la Universidad de Guipuzcoa sobre la Transformada de Fourier  
[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/fourier/fourier\\_1.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/fourier/fourier_1.html)  
Último acceso: septiembre 2018
- [27] Página web de electronicaengeneral, documento sobre el teorema de Nyquist.  
<http://electronicaengeneral.com/wp-content/uploads/2016/11/Nyquist.pdf>  
Último acceso: septiembre 2018
- [28] Página web de redeweb, documento sobre análisis espectral, Leakage.  
[http://www.redeweb.com/\\_txt/619/78.pdf](http://www.redeweb.com/_txt/619/78.pdf)  
Último acceso: septiembre 2018
- [29] Biblioteca de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, documento sobre el análisis en el dominio de la frecuencia.  
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3828/fichero/Cap%C3%ADtulos%252F4+An%C3%A1lisis+en+el+dominio+de+la+frecuencia.pdf>  
Último acceso: septiembre 2018
- [30] Universidad de las Américas Puebla, documento sobre la Transformada de Wavelet  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/meie/rosas\\_o\\_mc/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/rosas_o_mc/capitulo2.pdf)  
Último acceso: septiembre 2018

- [31] Biblioteca de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, documento sobre la Transformada de Wavelet.  
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11511/fichero/PFC+Silvia+Blasco+Vadillo%252FCap%C3%ADulo+9+--+Anexo+2.pdf>  
Último acceso: septiembre 2018
- [32] R. Moreno, P. Pintado, J.M. Chicharro, A.L. Morales, and A.J. Nieto. Methodology for evaluating neural networks input for gear fault detection. In IEEE International Conference on Mechatronics, pages 1–6, Malaga, April 2009.
- [33] Universidad de las Américas Puebla, documento sobre la Transformada de Wavelet  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/meie/osorio\\_s\\_a/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/meie/osorio_s_a/capitulo2.pdf)  
Último acceso: septiembre 2018
- [34] A. Jensen and A. la Cour-Harbo. Ripples in Mathematics. Springer, 2000
- [35] Q. Hu, Z. He, Z. Zhang, and Y. Zi. Fault diagnosis of rotating machinery based on improved wavelet package transform and SVMs ensemble. Mechanical Systems and Signal Processing, 21:688–705, 2007.
- [36] Página web Definición.DE, definición de rodamiento.  
<https://definicion.de/rodamiento/>  
Último acceso: septiembre 2018
- [37] Biblioteca de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, Proyecto fin de carrera “Diagnostico de fallos en rodamientos”. Carlos Navarro Pintado.  
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5704/fichero/PFC+Maria+Navarro.pdf>  
Último acceso: septiembre 2018
- [38] Página web aficionadosalamecanica, imagen de las partes de un rodamiento.  
<http://www.aficionadosalamecanica.com/hazlo-rodamientos.htm>  
Último acceso: septiembre 2018
- [39] Página web Power-mi, desequilibrio y medida de la fase vibratoria  
<https://power-mi.com/es/content/desequilibrio-y-medida-de-la-fase-vibratoria>  
Último acceso: septiembre 2018
- [40] Página web Power-mi, causas del desequilibrio  
<https://power-mi.com/es/content/causas-del-desequilibrio>  
Último acceso: septiembre 2018
- [41] Página web Power-mi, desalineación.  
<https://power-mi.com/es/content/desalineaci%C3%B3n>  
Último acceso: septiembre 2018

- [42] Página web Power-mi, holgura.  
<https://power-mi.com/es/content/holguras>  
Último acceso: septiembre 2018
- [43] Peng, Z., "Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography", *Mech Syst Signal Process* 18, 199-221 (2004)
- [44] Sabnavis, G., Kirk, R.G., Kasarda, M., Quinn, D., "Cracked shaft detection and diagnostics: A literature review", *Shock Vib. Dig.* 36, 287-296 (2004)
- [45] Jean-Jacques, S., "Detection of cracks in rotor based on the 2X and 3X super-harmonic frequency components and the crack-unbalance interactions," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 13, 2024-2040 (2008)
- [46] Gómez, M.J., Castejón, C., García-Prada, J.C., "Crack detection in rotating shafts based on the 3x energy. Analytical and experimental analysis", *Mechanism and Machine Theory* 96, 94-106 (2016)
- [47] Página web de Omega, acelerómetro.  
<https://es.omega.com/prodinfo/acelerometro.html>  
Último acceso: septiembre 2018
- [48] Página web de Brüel & Kjaer, acelerómetro 4383.  
<https://www.bksv.com/en/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/accelerometers/4383>  
Último acceso: septiembre 2018
- [49] Página web de Brüel & Kjaer, acelerómetro 4383 características.  
<https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2041.ashx>  
Último acceso: septiembre 2018
- [50] Página web de Brüel & Kjaer, Nexus CCLD Signal Conditioner.  
<https://www.bksv.com/en/products/transducers/conditioning/cclld/2693-A-0F4>  
Último acceso: septiembre 2018
- [51] Página web de Brüel & Kjaer, Nexus CCLD Signal Conditioner, características.  
<https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1702.ashx>  
Último acceso: septiembre 2018
- [52] Página web de RS, adquisición de datos Keithley, características.  
<https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/12ba/0900766b812baf18.pdf>  
Último acceso: septiembre 2018

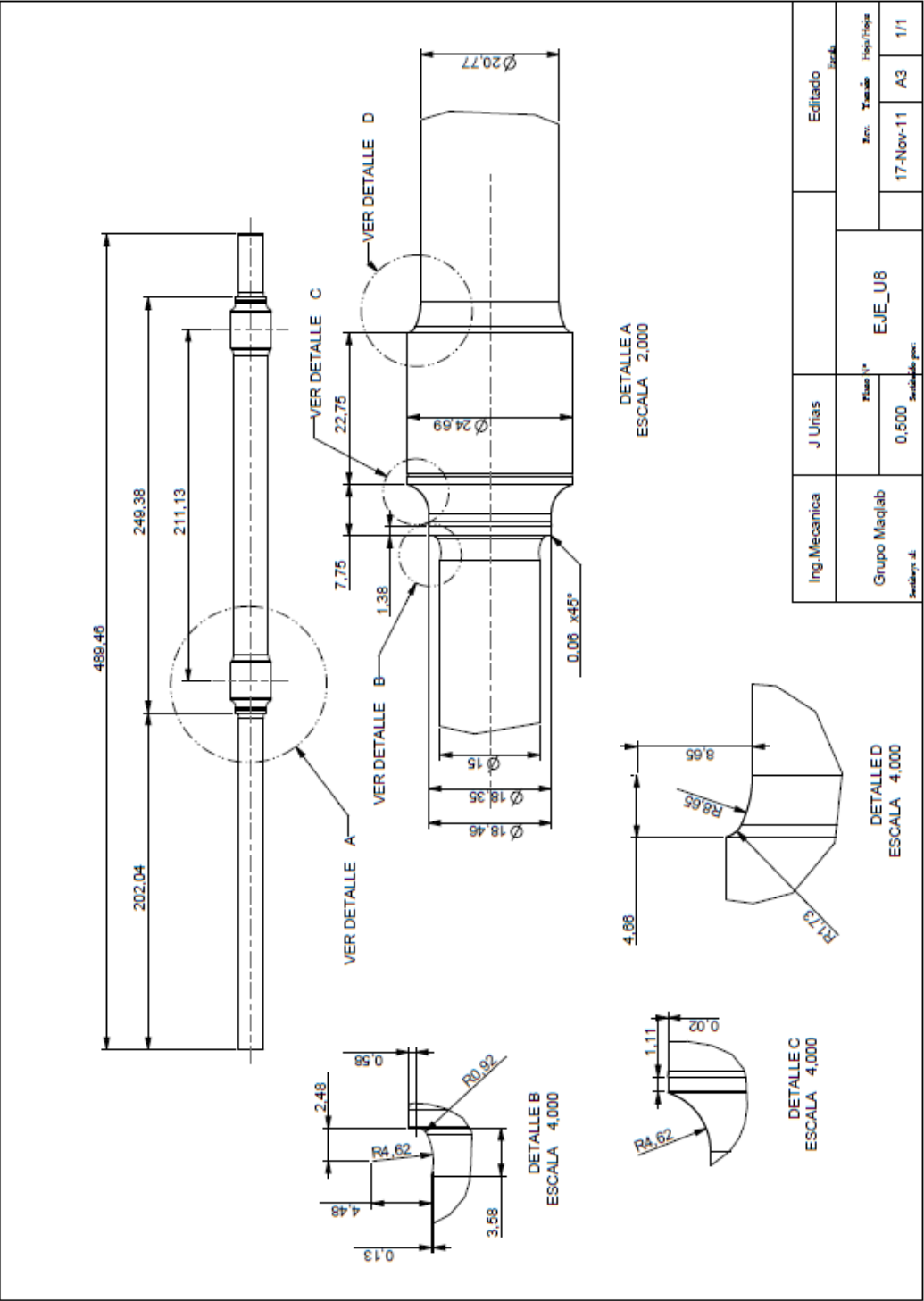
[53] J. Romero, “Herramienta para la adquisición, procesamiento y monitorización de señales. Detección de fallos en ejes y rodamientos mecánicos”, Proyecto fin de carrera, Dpto. de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/13035>

[54] J.C. García Prada y J.I. Pedrero Moya, “Vibraciones aleatorias” en Cálculo, construcción y ensayo de Máquinas I. Vibraciones en Máquinas, 1ªed. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 1993, 24-29.



8. ANEXOS

A. PLANO DEL EJE



ESCALA 1:8